

**AŞIRI SELENYUM KATKILI SİYAH SİLİSYUM GÖRÜNÜR
VE KIZİLÖTESİ DEDEKTÖRLERİN ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

**FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF
SELENIUM HYPERDOPED BLACK SILICON VISIBLE
AND INFRARED DETECTORS**

OZAN AYDIN

YRD. DOÇ. DR. TUNAY TANSEL
Tez Danışmanı

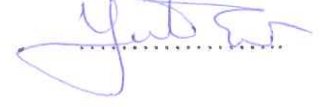
Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır

2017

OZAN AYDIN'ın hazırladığı “AŞIRI SELENYUM KATKILI, SİYAH SİLİSYUM GÖRÜNÜR VE KIZILÖTESİ DEDEKTÖRLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından NANOTEKNOLOJİ VE NANOTIP ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Yüksel ERGÜN

Başkan



Yrd. Doç. Dr. Tunay TANSEL

Danışman



Prof. Dr. Recai ELLİALTIOĞLU

Üye



Doç. Dr. Mehmet Emre TAŞGIN

Üye



Doç. Dr. Akın BACIOĞLU

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.
(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)
- Tezimin/Raporumun / / tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.
(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)
- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.
- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi

24/07/2017



Ozan AYDIN

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada, tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu, atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı beyan ederim.

12/07/2017



Ozan AYDIN

ÖZET

AŞIRI SELENYUM KATKILI SİYAH SİLİSYUM GÖRÜNÜR VE KIZILÖTESİ DEDEKTÖRLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Ozan AYDIN

Yüksek Lisans, Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Tunay TANSEL

Haziran 2017, 98 sayfa

Silisyum (Si) malzemesinin yasak bant aralığı haricinde, görünür bölgede (VIS) ve yakın kızılötesi (NIR) radyasyon algılaması dışında, düşük maliyetle ve yüksek performansla gece görüş uygulamalarında kullanılabilmesi amacıyla lineer hızlandırıcıda çift donör iyon olan selenyum (Se) ekimi yapılmış, iyon ekimi sırasında amorflaşan yüzey nanosaniye atımlı lazer (Nd:YAG) ile hem çabuk yüzey eritme ve aktivasyon enerjisi verilerek donör iyonların p-türü Si(100) alt taban iyonları ile bağ kurarak aktivasyonu, hem de belli enerji yoğunlukları ile lazer operasyonu yapılarak bir örnekte yalnızca eritme ile kristalizasyon, diğer örnekte ise kristalizasyon yanı sıra 300 nm derinlikte yüzeyin pürüzleşmesi sağlanmıştır. İyon ekimi yapılan silisyumun yüzey eritme yapılmadan önce, yapıldıktan sonra ve pürüzleştirme yapıldıktan sonra geçirgenlik ve yansıma katsayıları oranları FTIR'da ölçülerek absorptans hesabı yapılmış, bu absorptanslardan ışığın soğurma katsayısı hesaplanmıştır. Sonrasında ise bu örneklerin VIS & NIR spektrum için monokromatör, IR spektrum için FTIR spektral tepki ve siyah cisim ile tepe tepkisellikleri

oda sıcaklığı ve sıvı azot sıcaklığı dolaylarında ölçülmüştür. Bu verilerden yola çıkılarak ise Jones dedektivite (D^*) hesabı yapılmıştır. VIS & NIR bölge tepe tepkiselliği oda sıcaklığında 0 V gerilim için 20,4 A/W, -60 mV için 20,8 A/W ölçülmüştür ve %100 kesilim dalgaboyu 1,2 μm olarak gözlemlenmiştir. Sıvı azot kaynama sıcaklığında ise bu değerler 0 V için 12,1 A/W, -60 mV gerilim altında ise 12,2 A/W olarak ölçülmüştür. 1,8 J/cm^2 enerji yoğunluğu ile yalnızca eritme yapılarak elde hazırlanan örneklerde ise oda sıcaklığında VIS & NIR tepe tepkiselliği oda sıcaklığında 0 V için 67,3 A/W, -60 mV için ise 68,2 A/W, 79 K için ise 0 V için 56,4 A/W, -60 mV için ise 59,2 A/W olarak ölçülmüştür. VIS & NIR bölgede aşırı katkılı siyah silisyum örneklerde Jones dedektivite ise $10^{14} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ (Jones), aşırı katkılı pürüzlü olmayan fotodiyotlarda ise $10^{16} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ (Jones) olarak elde edilmiştir. MWIR & LWIR bantları için ise %100 kesilim dalgaboyu 9,5 μm olarak gözlemlenmiştir. Tepe tepkiselliği 10^{-5} A/W mertebelerinde ve dedektivitesi $10^{10} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. IR bölgede merteye bakımından pürüzlü ve pürüzsüz örnekler aynı mertebelerde tepkisellik ve D^* değerlerine sahiptir. Karanlık akımı engellemek için ise siyah silisyum örneklerine PECVD ile SiO_2 pasivasyonu yapılmış, pasivasyon sonrasında VIS & NIR bölge tepe tepkiselliği oda sıcaklığında 0 V gerilim için 32,4 A/W, -60 mV için 33,2 A/W ölçülmüştür. Yine aynı bölgede 79 K sıcaklıkta ise tepkisellik 0 V için 25,3 A/W, -60 mV için ise 25,6 A/W ölçülmüştür. D^* değerleri ise pasivasyon sonrasında siyah silisyum örnekler için VIS & NIR bölgede oda sıcaklığında 0 V için $10^{13} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$, -60 mV için $10^{14} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$, 79 K için ise 0 V ve -60 mV bias altında $10^{16} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ mertebelerindedir. IR bölge için ise pasivasyon sonrasında siyah silisyum örneklerin tepe tepkisellik, kuantum verim ve D^* değerleri yüz kat kadar artış göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşırı katkılı, dedektivite, fotovoltaiik, görünür bölge, kızılötesi, pasivasyon, selenyum, silisyum, tepkisellik, yarıiletken.

ABSTRACT

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF SELENIUM HYPERDOPED BLACK SILICON VISIBLE AND INFRARED DETECTORS

Ozan AYDIN

Master of Science, Nanotechnology and Nanomedicine Division

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Tunay TANSEL

June 2017, 98 pages

Selenium (Se) ions which are double donor ions, were implanted under the linear accelerator into the 100 oriented silicon (Si) material could be used for night vision applications with low cost and high performance, except only for the visible band (VIS) and near infrared (NIR) The laser is operated with the activation of the donor ions by the p-type Si (100) substrate ions by the application of the rapid surface melting and activation energy with the amorphous surface nanosecond laser (Nd:YAG) and the laser energy with specific energy densities for crystallization, in the other case crystallization as well as surface smoothing at 300 nm depth. The ion-implanted silicon, after surface roughening and after the surface smoothing, the permeability and reflection coefficient ratios were measured in FTIR and the absorptance was calculated and the absorption coefficient of the light was calculated from these absorptances. Subsequently, those samples were measured at monochromator for VIS & NIR spectrum, FTIR spectral response for IR spectrum and peak response with black body at room temperature and liquid nitrogen temperature. Jones detectivity (D^*) value was calculated from this data. VIS & NIR region peak response was measured as 20.4 A/W for 0 V voltage and 20.8 A/W for -60 mV at room temperature and 100% cut-off wavelength was observed at 1.2 μm . Jones detectivity was calculated as $10^{14} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ (Jones). For MWIR & LWIR

bands, 100% cut-off wavelength was observed to be 9.5 μm . Peak responsivity was calculated at 10^{-5} A/W and detectivity was calculated as 10^{10} $\text{cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$. In order to prevent surface leakage current, PECVD passivation of SiO_2 was deposited to the rough surface. After passivation, VIS & NIR region peak responsivity was measured as 32.4 A/W for 0 V voltage and 33.2 A/W for -60 mV at room temperature. Detectivity was calculated as 10^{14} $\text{cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$. Detectivity in the IR region was calculated as 10^{13} $\text{cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ for 0 V bias and 10^{11} $\text{cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ for -60 mV bias. Only melted samples with 1.8 J/cm² energy density characterized with the responsivities 67.3 A/W for 0 V, 68.2 A/W for -60 mV bias at room temperature and 56.4 A/W at 0 V, 59.2 A/W at -60 mV for 79 K temperature. The D^* values was calculated the order of 10^{13} $\text{cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ for 0 V bias and 10^{14} $\text{cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ for -60 mV bias at the room temperature.

Keywords: Detectivity, hyperdoped, infrared, passivation, photovoltaics, responsivity selenium, silicon, semiconductor, visible region.

TEŞEKKÜR

Bu tezi yazarken, başta bilimsel olmak üzere bana pek çok konuda destek olan ve engin bilgisini ve tecrübesini benimle tereddütsüz paylaşan çok değerli danışmanım, Sayın Yrd. Doç. Dr. Tunay TANSEL'e,

Laboratuvar çalışmamı yapabilmem için bana her türlü desteği sunan Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü öğretim üyeleri Doç. Dr. Bülent ASLAN, Doç. Dr. Uğur SERİNCAN, Doç. Dr. Mustafa KULAKÇI'ya,

Bana çokça emek sarf eden, bildikleri her şeyi benimle koşulsuz paylaşan ve beni evimde hissettiren Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı öğrencileri, değerli arkadaşlarım Melih KORKMAZ'a, Seval ŞAHİN'e, Burcu ARPAPAY'a, Onur ŞENEL'e ve Hazal ZAIMLER'e,

Tezimi hazırlayabilmem için bana kapılarını açan ve bana her türlü desteği sunan Nükleer Bilimler Enstitüsü eski müdürü Sayın Prof. Dr. Haluk UTKU'ya, müdür yardımcısı Sayın Doç. Dr. Mehmet Emre TAŞGIN'a, Uzm. Dr. Neslihan SARIGÜL'e, Uzm. Nurhak TATAR'a, Nurten TÖRE'ye ve Sebahat KÖFTECİ'ye ve çalışma arkadaşım Berk BAŞTÜRKMEN'e,

Laboratuvar çalışmamı yapabilmek için bana laboratuvarlarını açan ve her türlü malzeme ve donanım desteğini sağlayan Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi (GÜNAM) müdürü Sayın Prof. Dr. Raşit TURAN'a,

GÜNAM bünyesinde öğrencilik yapan değerli arkadaşlarım Dr. Bülent ARIKAN'a, Emine Hande ÇİFTPINAR'a, Mete GÜNÖVEN'e, Sâlar H. SEDANİ'ye, Zişan İrem ÖZYURT'a ve Yücel EKE'ye,

Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği öğretim üyesi ve Amorf Yarıiletkenler Laboratuvarı (AYİL) grup lideri sayın Doç. Dr. Akın BACIOĞLU'na, Fizik Mühendisliği doktora öğrencisi Kemal RÜZGÂR'a,

Değerli arkadaşlarım Aykut BİLİR'e, Ebru TAMAHKAR'a, Özlem CEYLAN'a,

Hayatımın her zor ânında bana destek olan, varlığı ve sevgisi için kendisine minnettar olduğum hayat arkadaşım Ezgi VARDAR'a,

Beni bu günlere getirmek için her zorluğu göğüslemiş olan ve desteklerini her zaman hissettiğim annem Prof. Dr. Yasemin AYDIN ve babam Prof. Dr. Süleyman AYDIN'a,

En samimi teŖekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca bu tezde kullanılan örneklerin hazırlanması için Dr. Roman BÖTTGER ve Almanya, Dresden’de bulunan Helmholtz Zentrum Dresden-Rossendorf’a teŖekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 AMAÇ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1 GÖRÜNÜR (VIS) VE KIZILÖTESİ (IR) IŞIMA.....	4
2.2 YARIİLETKENLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ	5
2.3 TEK TARAFLI KESKİN P-N+ EKLEMLER	6
2.4 AŞIRI KATKILAMA	11
2.4.1 Ara Bant (IB) Modeli.....	11
2.4.2 İyon Yerleştirme	13
2.4.3 Nanosaniye Atımlı Lazer Operasyonu.....	14
2.5 DEDEKTÖRLER.....	16
2.5.1 Termal Dedektörler.....	16
2.5.2 Foton Dedektörleri.....	17
2.6 BAŞLICA KULLANILAN DEDEKTÖR TÜRLERİ	18
2.6.1 HgCdTe (MCT) Dedektörler	18
2.6.2 InSb Dedektörler.....	19
2.6.3 PbSe Dedektörler	19
2.6.4 InGaAs Dedektörler.....	19
2.6.5 Germanyum (Ge) Dedektörler	19
2.6.6 Silisyum (Si) Dedektörler	19
2.6.7 Siyah Silisyum (b-Si) Dedektörler.....	20
2.7 BAŞARI ÖLÇÜTLERİ.....	20
2.7.1 Spektral Tepki.....	20
2.7.2 Tepkisellik	21
2.7.3 Kuantum Verimliliği.....	21

2.7.4	Karanlık Akım	21
2.7.5	Spesifik Dedektivite (D*)	22
3.	MATERYAL VE YÖNTEMLER	23
3.1	İYON YERLEŞTİRME	23
3.2	ATIMLI LAZER OPERASYONU	23
3.2.1	Yüzey Eritme	23
3.2.2	Yüzey Dokulandırma	26
3.3	OPTİK ÖLÇÜMLER	26
3.4	AYGIT FABRİKASYONU	27
3.4.1	Örnek Temizliği ve Doğal Oksit Kaldırma	28
3.4.2	Si ₃ N ₄ Sert Maske Kaplama, Fotolitografi ve Islak Aşındırma	28
3.4.3	Metal Kaplama ve Paketleme	30
3.5	ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLER	31
3.5.1	Karanlık Akım – Gerilim ölçümleri	31
3.5.2	Sıcaklığa Bağlı Kızılötesi Spektral Fototepki Ölçümü	32
3.5.3	Tepe Tepkisellik Ölçümleri	33
3.6	YÜZEY PASİVASYONU	34
4.	VERİLER ve TARTIŞMA	37
4.1	İYON YERLEŞTİRME	37
4.2	ATIMLI LAZER OPERASYONU	37
4.3	OPTİK ÖLÇÜMLER	40
4.4	MİKROFABRİKASYON	46
4.5	ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLER	48
4.5.1	Karanlık Akım – Gerilim Ölçümleri	48
4.5.2	Spektral Tepki, Tepe Tepkiselliği, Kuantum Verim ve Dedektivite	52
4.6	YÜZEY PASİVASYONU	62
5.	SONUÇLAR	68
5.1	ATIMLI LAZER OPERASYONU	68
5.2	OPTİK ÖLÇÜMLER	68
5.3	MİKROFABRİKASYON	68
5.4	ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLER	68
5.5	YÜZEY PASİVASYONU	69
6.	KAYNAKLAR	72
EKLER	83
EK 1: SİYAH SİLİSYUM	83

EK 2: İYON YERLEŞİMİ DERİNLİĞİ İÇİN SRIM HESAPLAMALARI.....	85
EK 3: SICAKLIĞA BAĞLI AKIM – GERİLİM, SPEKTRAL TEPKİ, TEPE TEPKİSELLİK GRAFİKLERİ.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	97

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2. 1: Elektromanyetik spektrum	4
Şekil 2. 2: Kızılötesi atmosferik geçirgenlik spektrumu [24]	5
Şekil 2. 3: (a) p-türü katkılama, (b) n-türü katkılama	7
Şekil 2. 4: p-n eklemi şeması ([26] kaynağından yeniden çizilmiştir.)	8
Şekil 2. 5: Besleme uygulanmadığı durumda p-n eklemi bant diyagramı ([27] kaynağından yeniden çizilmiştir).....	8
Şekil 2. 6: (a) İleri besleme, (b) geri besleme durumunda p-n eklemi ([27] kaynağından yeniden çizilmiştir)	9
Şekil 2. 7: (a) Katkısız esas yarıiletken (b) Harici seviyelerden bantın oluşmaya başlaması, (c) ara bant oluştuktan sonra yük taşıyıcılarının geçişi (Jeffrey Warrender "Black Silicon for Next-Generation Infrared Sensors" sunumundan uyarlanmıştır).	13
Şekil 2. 8: Lazer ışımalarını oluşturan uyarılma ışması.....	14
Şekil 2. 9: Lazerle yüzey eritme şeması [49]	15
Şekil 2. 10: Nanosaniye atımlı lazer operasyonunda tek atım için yüzey erimesi ve yeniden katılaşması için geçen süre diyagramı [49].....	16
Şekil 2. 11: İdeal fotodiyot tepkiselliği (kesilim dalgaboyu rastgele verilmiştir) [61] ..	20
Şekil 2. 12: İdeal fotodiyotun kuantum verimlilik (kesilim dalgaboyu rastgele verilmiştir).	21
Şekil 3. 1: Sığ katmanlı Se/Si(100) p-n+ yapı (çizim ölçekli değildir).....	24
Şekil 3. 2: Atımlı lazer ekipmanı (a) Turbo moleküler vakum pompası, (b) Nd:YAG SHG atımlı lazer, (c) vakum odası, (d) vakum kazanı elektriksel bağlantıları (gauge)	25
Şekil 3. 3: Geçirgenlik ve yansıma ölçümlerinde aynı FTIR ölçüm düzeneği kullanıldığı için [104].....	27
Şekil 3. 4: AZ5214E-IR'nin pozitif kullanımı için (a) fotorezistli yüzey üzerine maskenin yerleşimi, (b) ışınlama sonrası pozlanan bölgeler, (c) yüzeyin 1:4 AZ400K:H ₂ O çözeltisinde geliştirildikten sonra elde edilen desen, (d) HF ile fotorezist dışında kalan bölgelerden Si ₃ N ₄ kaldırılması, (e) KOH ile aşındırma sonrasında Si ₃ N ₄ 'lü fotodiyotlar, (f) HF ile diyot yüzeylerindeki Si ₃ N ₄ sert maskelerin kaldırılmasından sonra elde edilmiş olan Se/Si(100) aygıt.	30

Şekil 3. 5: (a) Piksel oluşturulmuş ve paketlenerek ölçüme hazır duruma getirilmiş W23 Se/Si(100) örneğin şeması (b) paketlenmiş örneğin fotoğraf görüntüsü. Gri kare alanlar piksel yüzeyleri (n+), gümüşü renkli alanlar Al atılmış alt taban (p kısmı).....	31
Şekil 3. 6: Sıcaklığa bağlı karanlık akım - gerilim ölçüm düzeneği	32
Şekil 3. 7: FTIR ile spektral tepki ölçümü deney düzeneği	33
Şekil 3. 8: Siyah cisim tepki tepkisellik düzeneği	34
Şekil 3. 9: VIS & NIR tepkisellik ölçüm düzeneği (monokromatör fotoğrafı http://assets.newport.com/web600w-EN/images/37920.jpg adresinden alınmıştır).....	34
Şekil 3. 10: Pasivasyon yapılan PECVD sistemi [113].....	36
Şekil 4. 1: 150 keV enerji ile Si(100) yüzeyine gönderilen Se iyonlarının dağılım profili	37
Şekil 4. 2: Selenyum iyon ekimi yapılmış silisyum örneğin Raman spektroskopisinde yapısal analizi, 480 cm ⁻¹ Raman kaymasında yüzey amorf.....	38
Şekil 4. 4: PECVD a-Si/c-Si(100) ve W23 örneklerinin hızlı erime ile kristalizasyon Raman kayması sonuçları	38
Şekil 4.5: 532 nm dalgaboyunda çalışan Q-anahtarlı Nd:YAG atımlı lazerin enerji yoğunluğu eşitliğine göre şekli ve ortalama derinliği.....	39
Şekil 4.6: Rofin Powerline E20 SHG PV Nanosaniye Derinlik ve güç kalibrasyonu ile (4.1) eşitliğinin kıyaslanması.....	40
Şekil 4.7: Se iyonlarının yerleştirildiği lazerle işlenmemiş W23 örneğinin (a) NIR, (b) MWIR ve LWIR bantları için soğurma yüzdeleri	40
Şekil 4.8: İyon yerleştirmesi yapılmış örneklerin, (a) NIR, (b) MWIR ve LWIR bantları için soğurma katsayıları (karşılaştırmalı)	41
Şekil 4.9: Soğurma katsayısından Tauc plot ile (a) referans p-Si(100), (b) Se/Si(100) (yalnız iyon yerleştirme yapılmış) bant aralığı elde edilmesi.....	42
Şekil 4.10: Atımlı lazer ile dokulandırılan yüzeyin ortalama derinlik ölçüm sonucu (0,35 W güç, 180 mm/s tarama hızı, 15 kHz frekans ve 15 µm) demet çapı).....	43
Şekil 4. 11: (a) 2,3 J/cm ² (b) 21 J/cm ² enerji ile taranmış yüzeyin SEM görüntüsü. 15 µm demet çapı	44
Şekil 4. 12: Atımlı lazerle oluşturulan pürüzlü yüzeylerin (a) NIR, (b) MWIR ve LWIR bantlarında soğurma asbsorptansları.....	45
Şekil 4.13: (a) NIR, (b) MWIR ve LWIR bantları için lazerle dokulandırılmış ve işlenmemiş W23 soğurma katsayısı (karşılaştırmalı) (c) NIR için Tauc çiziminden bant aralığı tayini	45

Şekil 4.14: AZ5214E-IR fotorezistininin (a) pürüzlü yüzeye göre kalibrasyon grafiği (b) fotolitografi işleminden sonra SEM görüntüsü.....	46
Şekil 4. 15: KOH ile mikrofabrikasyon için ağırlıkça (a) %40, (b) %50, (c) %60 derişimde, 90 °C sıcaklıkta, 30 saniye aşındırma sonunda yüzey profilometresi (belirleyici) görüntüleri.....	47
Şekil 4. 16: W23-5 örneğinin yüzey belirleyici görüntüsü	48
Şekil 4. 17: Se/Si(100) aşırı katkılı siyah silisyum karanlık akım – gerilim ölçümleri .	49
Şekil 4. 18: Se/Si(100) aşırı katkılı yalnızca eritme yapılan numune akım – gerilim ölçümleri	49
Şekil 4. 19: Se/Si(100) aşırı katkılı siyah silisyum fotodiyotların karanlık direnç değerleri	50
Şekil 4. 20: Se/Si(100) aşırı katkılı pürüzsüz silisyum diyotların karanlık direnci.....	51
Şekil 4. 21: Dirençten aktivasyon enerjisi elde edimi için Arrhenius çizimleri.....	52
Şekil 4. 22: 79 K ve 300 K için, 0 (Sıfır) V ve -60 mV’de VIS & NIR için dalgaboyuna bağlı tepkisellik grafikleri.....	53
Şekil 4. 23: Yalnız eritme yaparak elde edilmiş fotodiyotların 79 K ve 300 K sıcaklıkta VIS & NIR için dalgaboyuna bağlı tepkisellikleri.....	54
Şekil 4. 24: VIS & NIR için 0 V ve -60 mV için harici kuantum verimlilik grafikleri .	54
Şekil 4. 25: Yalnız eritme yaparak elde edilmiş fotodiyotların 79 K ve 300 K sıcaklıkta VIS & NIR için harici kuantum verimlilik grafikleri	55
Şekil 4. 26: 79 K ve 300 K sıcaklıklarda 0 V ve -60 mV gerilim altında D^* değerleri .	56
Şekil 4. 27: Yalnızca eritme yapılmış aşırı katkılı Se/Si(100) fotodiyotlar için 79 K ve 300 K için VIS & NIR dedektivitesi.....	56
Şekil 4. 28: Planck Dağılımı.....	57
Şekil 4. 29: 79 K sıcaklıkta 0 V ve -60 mV dalgaboyuna bağlı tepkisellikleri	59
Şekil 4. 30: Se/Si(100) örneğin MWIR & LWIR bantları için harici kuantum verimlilik grafikleri.....	59
Şekil 4. 31: 0 V ve -60 mV için D^* karşılaştırması	60
Şekil 4. 32: Yalnız eritme yapılan Se/Si(100) fotodiyotlarının 79 K sıcaklıkta dalgaboyuna bağlı tepkisellikleri	61
Şekil 4. 33: Yalnız eritme yapılan Se/Si(100) fotodiyotlarının harici kuantum verimleri (%)	61
Şekil 4. 34: Yalnız eritme yapılan Se/Si(100) fotodiyotlarının dedektivitesi	62

Şekil 4. 35: Pasivasyonlu ve pasivasyonsuz (a) akım gerilim ölçümleri, (b) direnç – gerilim ölçümleri.....	62
Şekil 4. 36: 79 K ve 300 K için pasivasyonlu ve pasivasyonsuz karşılaştırmalı VIS dalgaboyuna bağlı tepkisellikleri (a) 0V, (b) -60 mV.....	63
Şekil 4. 37: 79 K ve 300 K sıcaklıklar için pasivasyonlu ve pasivasyonsuz karşılaştırmalı (a) 0 V, (b) -60 mV için harici kuantum verimlilik grafikleri	64
Şekil 4. 38: 79 ve 300 K için VIS & NIR D* grafikleri (a) 0 V, (b) -60 mV	64
Şekil 4. 39: Se/Si(100) örneğin 79 K sıcaklıkta pasivasyonsuz ve pasivasyonlu 0 ve -60 mV gerilimde dalgaboyuna bağlı tepkisellikleri.....	65
Şekil 4. 40: Se/Si(100) örneğin (a) pasivasyonsuz, (b) pasivasyonlu 0 ve -60 mV gerilimde harici kuantum verimlilikleri.....	65
Şekil 4. 41: Se/Si(100) örneğin (a) pasivasyonsuz, (b) pasivasyonlu, 79 K sıcaklıkta 0 ve -60 mV gerilimde pasivasyonlu dedektivite değerleri.....	66
Şekil 4. 42: Maksimum sinyal şiddetinin sıcaklığa göre değişimi.....	67
Şekil 5.1: Bazı dedektörlerin ve kalkojen katmanlı silisyum tabanlı IR dedektörün farklı sıcaklıklarda karşılaştırmalı çalışma spektrumları (J. “Black Silicon for Next Generation Infrared Sensors” sunumundan yeniden uyarlanarak Se/Si spektrumu üzerine eklenmiştir)	70
Şekil 5. 2: Farklı dedektörlerin dedektiviteleri (Hamamatsu’dan alınan tabloya eklenmiştir) [131]	71
Şekil Ek3. 1: Se/Si(100) aşırı katkılı siyah silisyum aygıt 40 – 300 K arası, 10 K farkla ölçülen akım – gerilim ölçümleri (pasivasyonsuz).....	91
Şekil Ek3. 2: Se/Si(100) aşırı katkılı siyah silisyum aygıt 40 - 300 K arası 10 K farkla akım gerilim ölçümleri (pasivasyonlu).....	91
Şekil Ek3.3: (a) 0 V, (b) -60 mV gerilim altında VIS bölgede Se/Si(100) aygıtın fotoakım ölçümü	92
Şekil Ek3. 4: FTIR spektral tepki sinyalleri	92
Şekil Ek3. 5: DLaTGS arka plan sinyali.....	93
Şekil Ek3. 6: TE-InGaAs dedektör arka plan sinyali.....	93
Şekil Ek3. 7: MWIR ve LWIR bantlarında aygıtın spektral tepkisi.....	94
Şekil Ek3. 8: Se/Si(100) asiri katkılı siyah silisyum örneklerin 40 - 79 K arası IR tepe tepkisellikleri	95

Şekil Ek3. 9: Aşırı katkılı düz yüzeye sahip Se/Si(100) siyah silisyum örneklerin tepe tepkisellikleri tamamı 96

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1: Kristalizasyon yapılan a-Si örneklerin lazer eritme dozları.....	26
Çizelge 2: 300 K ve 79 K için farklı gerilimler altında akım gerilim değerlerinin dağılımı.....	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

τ_p : Lazer atım süresi

τ_m : Lazer eritme süresi

τ_s : Yeniden katılma süresi

T_m : Erime sıcaklığı

Δt_m : Yüzey erime süresi

$^{\circ}\text{C}$: Santigrat derece

Kısaltmalar

IR: Kızılötesi Bölge

NIR: Yakın Kızılötesi Bölge

SWIR: Kısa Dalga Kızılötesi Bölge

MWIR: Orta Dalga Kızılötesi Bölge

LWIR: Uzun Dalga Kızılötesi Bölge

VIS: Görünür bölge

UV: Mor ötesi

QWIP: Kuantum kuyu kızılötesi fotodetektör

HgTe: Civa tellür

CdTe: Kadmiyum tellür

HgCdTe: Civa kadmiyum tellür

MCT: Civa kadmiyum tellür

InSb: İndiyum antimoni

PbSe: Kurşun antimoni

InGaAs: İndiyum galyum arsenik

TE-InGaAs: Termoelektrik soğutmalı indiyum galyum arsenik

DTGS: Döteryum Triglisin Sülfat

DLaTGS: Döteryum L-alanin Triglisin Sülfat

Ge: Germanyum

Si: Silisyum
b-Si: Siyah Silisyum
D*: Spesifik dedektivite
Si₃N₄: Silisyum nitür
PECVD: Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
LPCVD: Alçak Basınçlı Kimyasal Buhar Biriktirme
MBE: Moleküler Demet Epitaksisi
FTIR: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi
A: Amper
V: Volt
W: Watt
IB: ara bant
eV: elektronvolt
nm: Nanometre
µm: Mikrometre
mm: Milimetre
cm: Santimetre
Hz: Hertz
T: Sıcaklık
k: Boltzmann sabiti
h: Planck sabiti
K: Kelvin
ns: Nanosaniye
fs: Femtosaniye
p-n: pozitif-negatif
p-i-n: pozitif-intrinsik-negatif
KOH: Potasyum hidroksit
HF: Hidroflorik asit
HCl: Hidroklorik asit
H₂O₂: Hidrojen peroksit
He: Helyum

N₂: Moleküler azot

Ar: Argon

IPA: İzopropanol

MEMS: Mikroelektromekanik sistemler

DI: deiyonize

1. GİRİŞ

1.1 AMAÇ

Bu tezin temel amacı, atımlı lazer eritme (pulsed laser melting – PLM) yöntemi ile hazırlanmış, geniş bantta çalışabilen, pürüzlü yüzeyi sayesinde ışığı üzerine gelen ışığı iyi soğurabilen ve yüksek dedektiviteye sahip, düşük maliyetli tek piksel silisyum tabanlı fotodedektör aygıt üretilmesidir.

Silisyum tabanlı aygıtın çalışma prensibi iki ana başlıkta incelenebilir. Birinci istenen, p türü silisyum alt taşa yerleştirilen çift donör iyonların (S, Se, Te) Mott limitinin üzerinde katkılanarak harici enerji seviyelerinin yoğunluğu ile yasak enerji aralığında bir ara bant (intermediate band – IB) oluşturmaktır [1]–[3]. Ara bant geçişleri sayesinde silisyumun tepki verdiği ışıktan daha düşük enerjili (veya daha büyük dalga boyuna sahip) ışımalara da tepki verebilmesidir ki bu ışımalar kızılötesi bölgeye tekabül etmektedirler. Böylece hem görünür (VIS), hem de yakın (NIR), orta dalga (MWIR) ve uzun dalga kızılötesi (LWIR) bölgelerde çalışabilen, çok işlevli bir fotodedektör elde edilmesi hedeflenmiştir.

Ara bant geçişleri ile ilgili çalışmalar daha çok güneş gözelerini temel almıştır. Literatürdeki konuyla ilgili yayınların çoğu orta bant güneş gözesi (intermediate band solar cell – IBSC veya intermediate band photovoltaics – IBPV) adıyla yer almaktadır[4]–[11]. Burada arzu edilen, tek p-n eklemli bir gözeden elde edilecek maksimum verim değeri olan Shockley – Quiesser (SQ) limitinin (veya ayrıntılı denge limiti) aşılması olmuştur [12]–[14]. Bunu da ilk kez Antonio Luque ve Antonio Martí 1997 yılında ara bant geçişi hesabını ilk kez yaparak, tek p-n eklemli güneş gözelerinin verimini SQ limitinin üzerine çıkarma yoluna gitmişlerdir [15]. Ara bant oluşturma işlemi silisyumun elektronik yapısını değiştiren bir işlemdir [16].

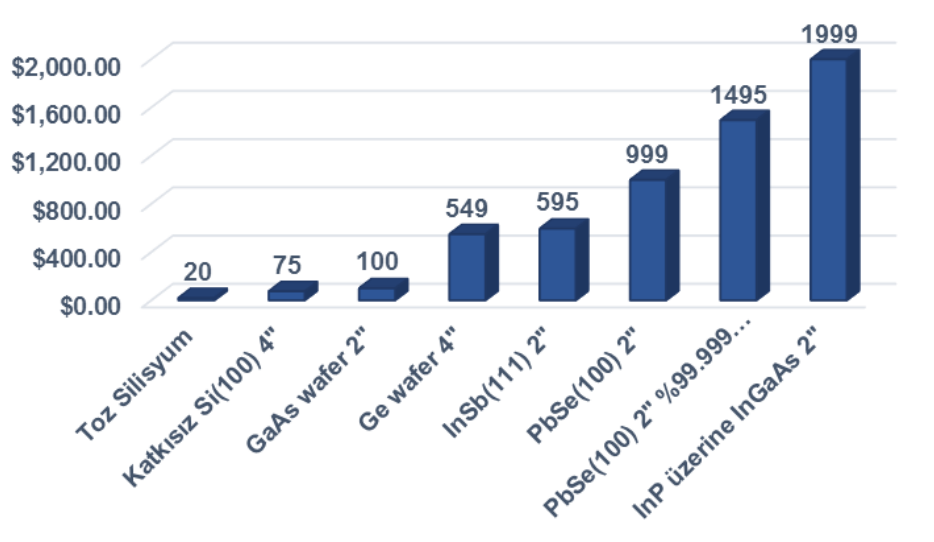
Çalışmanın ikinci ana motivasyonu ise, nanosaniye atımlı lazer (nanosecond pulsed laser) ile bu katkı iyonlarının aşırı katkılanmasının yanı sıra, yüzey morfolojisini değiştirmek ve yeniden kristallendirme ile oluşturulan silisyum aygıtı, gelen ışığın yüksek soğurma becerisi kazandırmak ve bu iki yöntemin birleştirilmesi ile geniş bantta çalışabilen ve yüksek tepkiselliğe sahip tek piksel fotodedektör aygıt üretilmesidir. Yüzeyin pürüzlülüğü, yapısına göre gelen ışığın geometrik tuzaklamasını sağlamakta ve ışığın soğurularak malzeme içinde hapsolmesini sağlamaktadır [17]. Malzemede absorbe edilen

toplam ışına miktarı Beer yasasına göre bir malzemenin üzerine gelen ışımayı soğurma şiddeti

$$I_{abs} = \int I_{güneş}(\lambda)[1 - R(\lambda)][1 - \exp[-\alpha(\lambda)d]]d\lambda \quad (1.1) [17]$$

ile verilir [17]. Burada R ve α dalga boyuna bağlı yansımaya ve soğurma (absorption) katsayısı, d fotonun malzeme içinde aldığı yol, integral ise tüm λ dalga boyları üzerindedir [17]. Pürüzlü bir yüzeyin ışığı yansıtma ihtimali parlak bir yüzeye göre çok daha düşük olacağı için, soğuracağı ışık miktarı artacak, bu da ışığa duyarlı olan aygıtın (bizim için bu aygıt fotodedektördür) verimini arttıracaktır.

Kullanılmak istenen fotodedektörün malzemesinin silisyum olmasının temel nedeni ise silisyumun maliyetinin düşük olmasıdır (Şekil 1.1). Silisyum, yer kabuğunun kütlece %28'ini oluşturan [18], bu yüzden de kolaylıkla elde edilen ve maliyeti oldukça düşük olan bir yarıiletken malzemedir. Elektriksel ve optiksel [19], [20] kullanışlılığı, oda sıcaklığında katı oluşu, mekanik basınç altında piezodirenç etkisine sahip olması [21] gibi fiziksel özelliklerinden ve bu özelliklerinden dolayı transistör, tümleşik devre gibi elektronik devrelerde kullanılabilirliği yüksektir. Toprak veya kum gibi SiO_2 yapılarından elde edildiğinden dolayı silisyum tabanlı teknolojilerde ham madde sıkıntısı yaşanmamaktadır. Öyle ki günümüzde silisyum fotonığı adı verilen bir teknoloji alanı bile oluşmuştur [22].



Şekil 1.1: Yarıiletken malzemelerin fiyat karşılaştırması (alibaba.com'daki fiyatlar üzerinden değerlendirilmiştir)

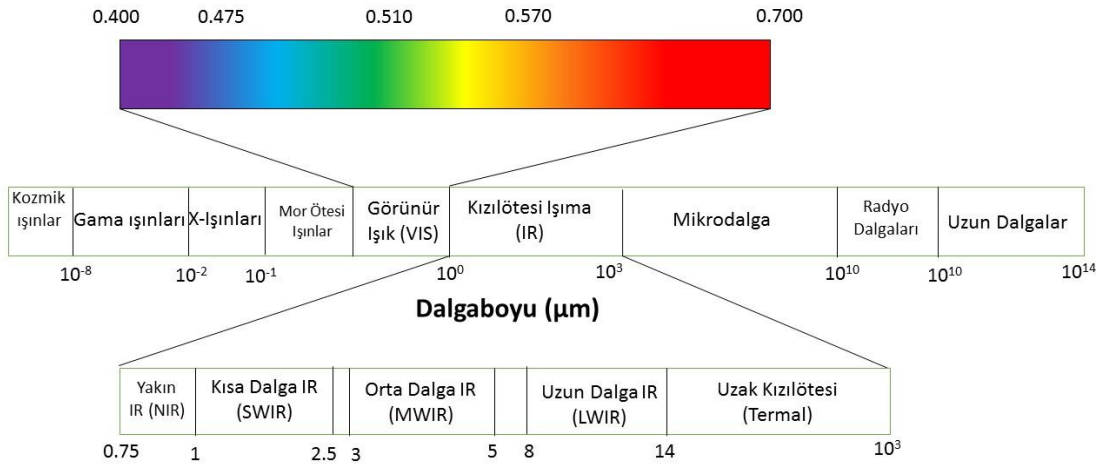
Kristal silisyumun bant aralığı 1,1 eV'dir [23]. Bu bant aralığı yakın kızılötesi (NIR) aralığına tekabül etmektedir. 1,1 eV enerjiden daha düşük enerjili fotonlar yüzeyine

düştüğünde, silisyum tepki vermez. Oysa farklı katkılamalar sayesinde silisyumun daha düşük enerjili ve daha uzun dalga boylu elektromanyetik dalgaları algılamasını sağlamak mümkündür. Yapılan çalışma, bunun mümkün olduğunu, bu sayede orta dalga (MWIR) ve uzun dalga (LWIR) bantlarında silisyumun bir dedektör olarak çalışabildiğini ortaya koymaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

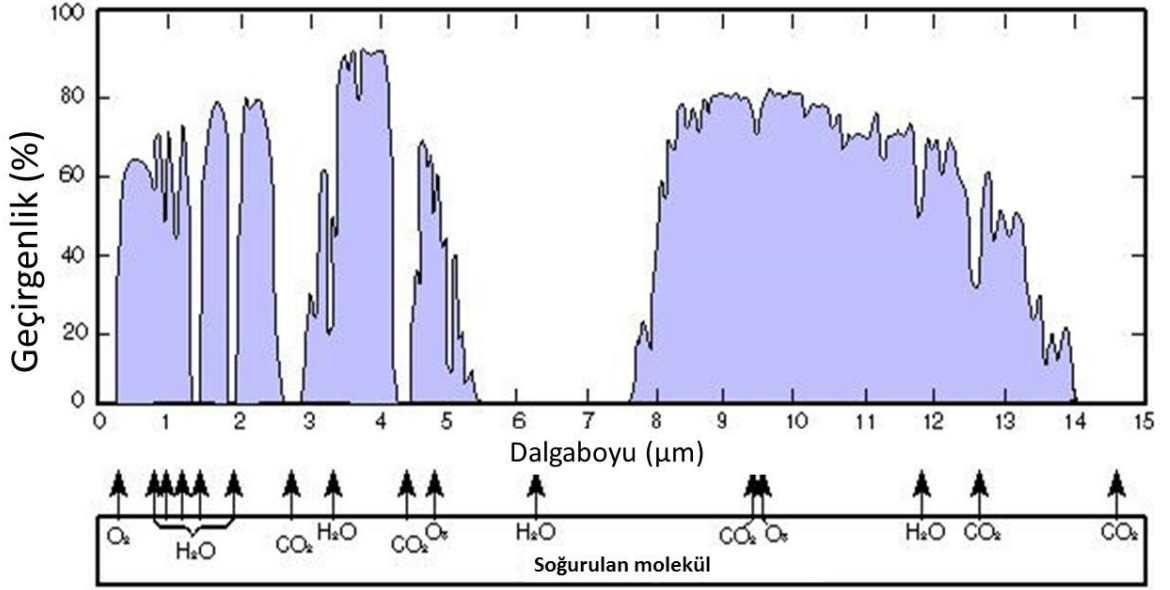
2.1 GÖRÜNÜR (VIS) VE KIZILÖTESİ (IR) IŞIĞI

Elektromanyetik dalgalar boşlukta ışık hızı $c \approx 3 \times 10^8$ m/s ile yayılan dalgalardır. Farklı frekanslarda ve dalga boylarında yayılan elektromanyetik dalgalar ise bir tayf (spektrum) oluştururlar. Buna **elektromanyetik tayf (spektrum)** adı verilir. Elektromanyetik tayf içindeki 1 mm ile $0,7 \mu\text{m}$ arasındaki ışığa kızılötesi, $0,7 \mu\text{m}$ 'den $0,4 \mu\text{m}$ 'ye kadar olan ışığa ise görünür ışık olarak tanımlanır (Şekil 2.1).



Şekil 2. 1: Elektromanyetik spektrum

Kızılötesi bölgedeki atmosferik geçirgenlik ve soğurulan moleküller ise Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2. 2: Kızılötesi atmosferik geçirgenlik spektrumu [24]

2.2 YARIİLETKENLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Yarıiletkenler, belli koşullarda iletken, belli koşullarda ise yalıtkan olarak davranabilen amorf veya kristal yapıdaki katılardır. Koşullara göre iletkenliklerinin ve bant aralıklarının değişimi ise elektro-optik aygıtların üretilmesinde kullanışlılık sağlamaktadır.

Bir yarıiletkenden optik bir sensör elde edebilmek için ışığa duyarlı olması ve bir fotoakım yaratılması gerekmektedir. Bunun için de yarıiletkende fotoakım yaratabilmek için değerlik bandında bulunan bağlı elektronlar, malzemenin üzerine düşen fotonların enerjisi ile en az yasak bant aralığının enerjisi kadar enerji ile uyarılırlarsa iletkenlik bandına geçerler ve bir fotoakım oluşur (Şekil 2.4)

Yarıiletkenler, bant yapılarına göre *doğrudan* bant aralıklı ve *dolaylı* bant aralıklı olmak üzere sınıflandırılırlar. Brillouin bölgesinde kristal momentumu (\mathbf{k} vektörü) aynı olan yarıiletken yapılar doğrudan bant aralığına, farklı olan yapılar ise dolaylı bant aralığına sahiptirler [25]. Bant aralığı doğrudan olan yarıiletkenlerde değerlik bandı ile iletkenlik bandı arasındaki geçiş yalnızca foton soğurulması veya yayınımları ile gerçekleşir. Dolaylı bant geçişinde ise fotonun soğurma veya yayınımlarının yanı sıra kristal içinde fonon soğurulması veya yayınımları da ortaya çıkmaktadır. Galyum arsenit (GaAs) indiyum

antimonit (InSb) gibi yarıiletkenler doğrudan bant aralığına sahipken, silisyum (Si), germanyum (Ge) gibi yarıiletkenler dolaylı bant aralığına sahiptirler.

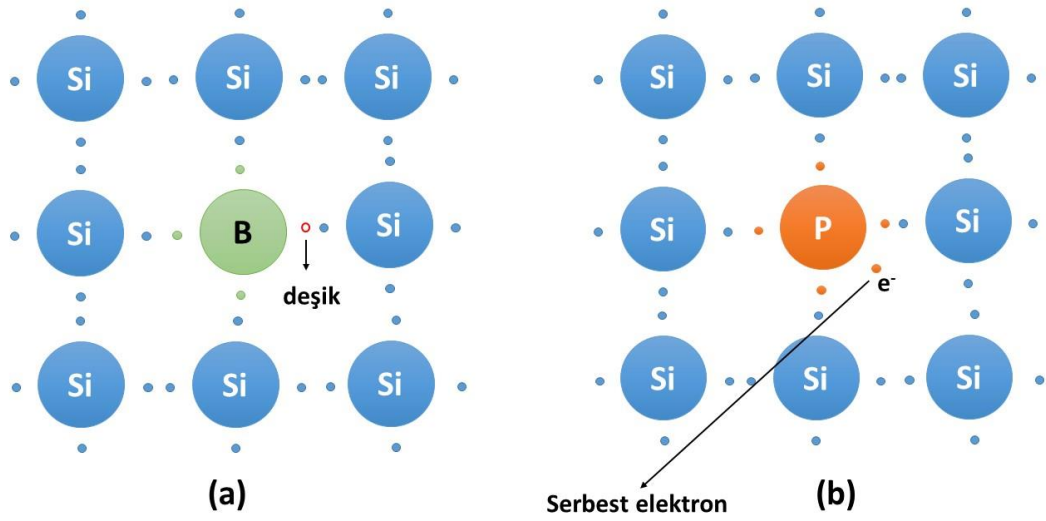
2.3 TEK TARAFLI KESKİN P-N+ EKLEMLER

Yarıiletkenlerde, safsızlık olmadığı takdirde termal denge durumunda yük taşıyıcıları yoğunluğu (elektronlar ve deşikler) eşittir (2.4) burada n esas (intrinsik) elektron, p (intrinsik) deşik, sayısıdır ve bunlar birbirine eşittir (n_i)

$$n = p = n_i \quad (2.1)$$

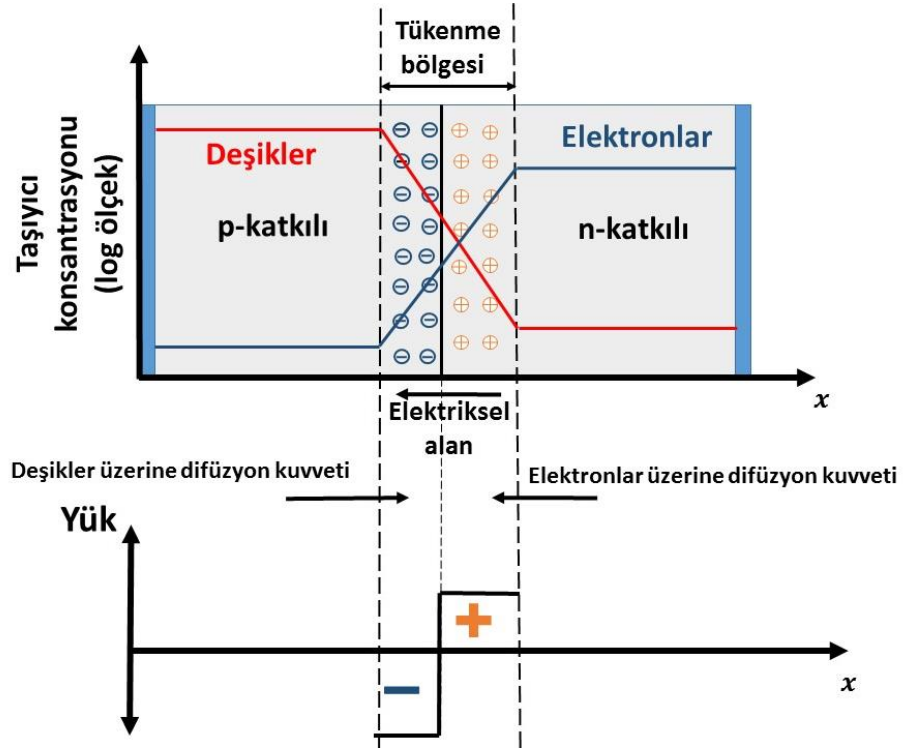
Yarıiletken aygıt üretiminde bir diğer önemli etken ise safsızlıktır. Kristal örgünün içinde esas malzemenin içindeki katkı iyonları malzemenin iletkenlik özelliğini bant yapısını değiştirebilmektedir. Örneğin, silisyum IVA grubu elementidir ve dört değerlik elektrona sahip bir yarıiletken malzemedir. Bu kristal örgüye değerlik elektron sayısı üç olan bir IIIA grubu iyonu (örneğin bor –B) katıldığı takdirde örgüdeki bir silisyum iyonunun yerine geçecek, ancak değerlik elektron sayısı silisyumdan bir tane az olduğu için ortama bir adet deşik vermiş olacaktır ve kristalin elektron miktarı azalacaktır ve $p > n$ olacaktır. Elektronegatifliği azalan kristal ise daha artı (pozitif) yüklü olacaktır. Ortama deşik veren bu katkılama iyonlarına *alıcı* veya *kabul edici (akseptör)* iyonlar, yapılan katkılama türüne de *p-türü katkılama* adı verilir. Eğer silisyum örgüye beş değerlik elektrona olan VA grubu elementi olan fosfor veya arsenik ile katkılama yapılacak olursa, bu defa da örgüye bir serbest elektron verilmiş olacaktır. Bu şekilde elektron sayısı deşik sayısından daha fazla olacak ($n > p$) ve bu durumda daha eksi (negatif) bir katkılama yapılmış olacaktır. Ortama elektron veren katkı iyonlarına ise *verici (donör)* iyonlar adı verilir ve katkılama türüne *n-türü katkılama* denir (Şekil 2.3). Bu yük taşıyıcılarının miktarlarının çarpımı ise termal denge durumunda sabittir ve esas kristal içindeki yük taşıyıcı miktarının karesine eşittir (2.2). Buna kütle-eylem yasası (mass-action law) adı verilir.

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2 \quad (2.2)$$

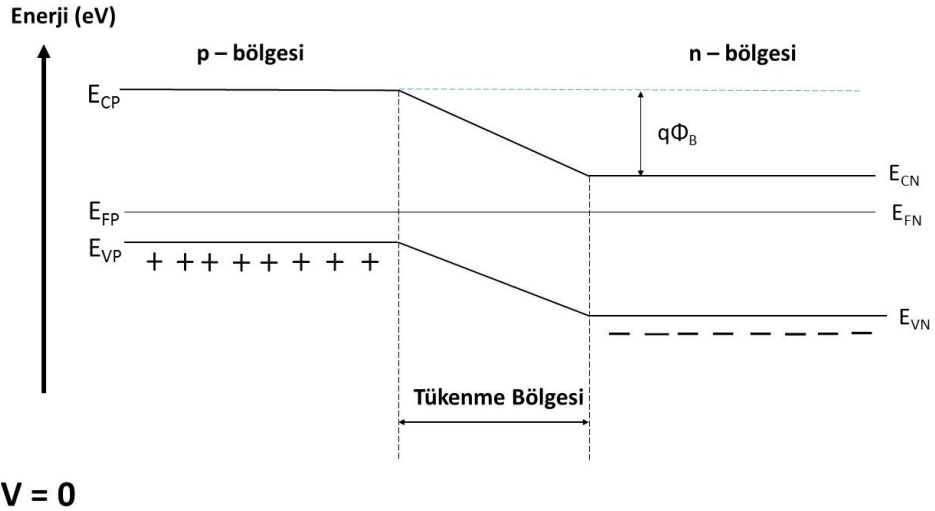


Şekil 2. 3: (a) p-türü katkılama, (b) n-türü katkılama

Optoelektronik aygıtlar, safsızlık oluşturulmuş yarıiletken aygıtların artı – eksi (pozitif – negatif $-p-n$) eklemi oluşturulması yoluyla meydana gelirler. Bu meydana getirilen p-n eklemi içinde elektronlar ve deşikler arasında bir elektrik alan ve elektrik akımı oluşur. Aygıtın p-türü kısmındaki fazlalık taşıyıcılar deşikler, n türü bölgesindeki fazlalık taşıyıcılar ise elektronlardır (Şekil 2.5). Ayrıca tükenme bölgesinde p-bölgesinde azınlık taşıyıcı olarak elektronlar, n-bölgesinde ise deşikler bulunurlar (Şekil 2.4)



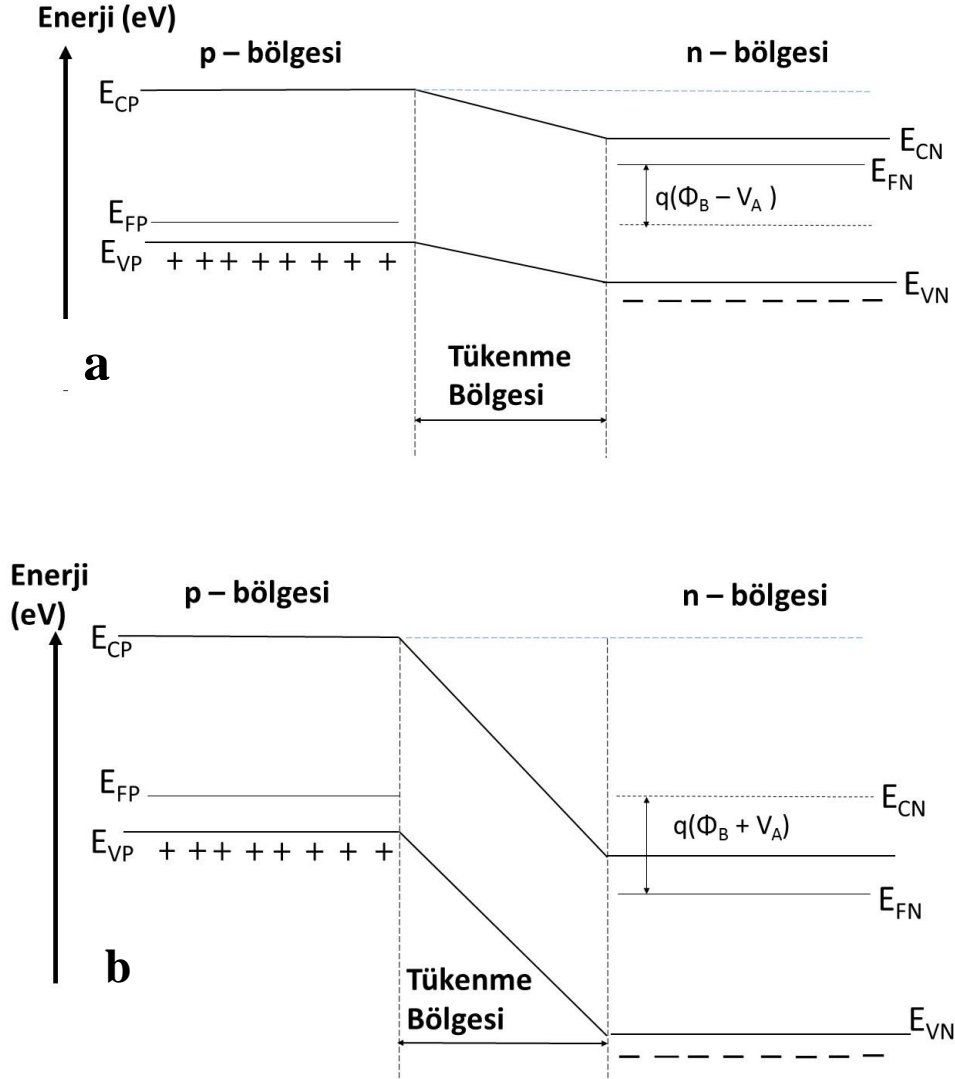
Şekil 2. 4: p-n eklemi şeması ([26] kaynağından yeniden çizilmiştir.)



Şekil 2. 5: Besleme uygulanmadığı durumda p-n eklemi bant diyagramı ([26] kaynağından yeniden çizilmiştir).

Şekil 2.7'de sıfır voltaj altında bant diyagramı verilmiştir. Burada E_{CP} , p bölgesi iletkenlik bandı alt sınırı, E_{VP} , P bölgesi değerlik bandı üst sınırı, E_{FP} P bölgesi için Fermi seviyesi, E_{CN} , iletkenlik bandı için iletkenlik bandı alt sınırı, E_{VN} , N bölgesi için değerlik bandı üst sınırı, E_{FN} N bölgesi Fermi seviyesi, Φ_B bariyer potansiyel farkı, bir başka deyişle yapısal potansiyeldir. Eğer, bir pn eklemi, ileri beslenecek olursa, p ve n bölgelerinin iletkenlik ve değerlik bantları birbirlerine yaklaşacaktır ve denge durumunda bulunan yapısal

potansiyel (built-in potential) azalacaktır. (Şekil 2.6-a). Geri besleme halinde de bu iki bant sınırları birbirlerinden uzaklaşacaklardır ve yapısal potansiyel ise artacaktır (Şekil 2.6-b). Diyot doğrultmasını sağlayan bu yapısal potansiyeldir. İleri beslemede serbest yük taşıyıcıları kolayca bir banttan diğerine geçebilirlerken, geri beslemede bu yapısal potansiyel arttığı için bu söz konusu değildir. Bu yüzden pn eklemelerinden elde edilen diyotlar akımı tek yönlü geçirirler.



Şekil 2. 6: (a) İleri besleme, (b) geri besleme durumunda p-n eklemi ([26] kaynağından yeniden çizilmiştir)

Yarıiletken içinde dar bir bölgeyi, çoğunluk yük taşıyıcıları ile çok fazla katkılama, o dar bölgede çok yoğun bir taşıyıcı konsantrasyonu sağlayacaktır [27]. Bu durum, denge durumunu bozan bir etki yaratmaktadır ve yapısal potansiyel farkı arttıran bir etkidir; dolayısıyla p-n eklemeleri arasındaki yük geçişi daha fazla olacaktır. Bu da pn eklemesinde

görülen akımı arttıracaktır [27], [28]. Çünkü aşırı katkılanan bölgelerin tükenme bölgeleri daha kısadır, dolayısıyla difüzyon mesafeleri de artacaktır [28].

Keskin eklemlerde tükenme bölgesi veya uzay yükü bölgesindeki yük dağılımı eşitliği Poisson denklemi ile verilir (2.3) [27].

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} = \frac{q}{\epsilon_s} (N_A - N_D) \quad (2.3)$$

Ψ burada elektrostatik potansiyel, q yük, ϵ_s yarıiletken elektriksel geçirgenliği, N_A alıcı (akseptör) yoğunluğu, N_D verici (donör) yoğunluğu, x tükenme bölgesi genişliğidir. Eğer, alıcı veya verici safsızlık iyonlarından birinin miktarı diğerinden çok daha fazla olursa ($N_D \gg N_A$ veya tam tersi) bu durumda daha az olan safsızlık iyonları ihmal edilebilir 2.3 eşitliği $0 < x \leq x_n$ ve $-x_p < x \leq 0$ için ayrı ayrı çözüldüğünde

$$N_A x_p = N_D x_n \quad (2.5)$$

Sonucu elde edilir. Hangi türdeki safsızlık iyon miktarı fazla ise, o bölgenin daha sığ olması gerekmektedir [27]. Toplam tükenme bölgesi genişliği ise

$$W = x_p + x_n \quad (2.6)$$

Olarak tanımlanır. En fazla (maksimum) elektrik alan \mathcal{E}_m , $-x_p < x \leq 0$ için

$$\mathcal{E}_m = -\frac{qN_A(x+x_p)}{\epsilon_s} \quad (2.7)$$

$0 < x \leq x_n$ için ise

$$\mathcal{E}_m = -\frac{qN_D(x-x_n)}{\epsilon_s} \quad (2.8)$$

olduğu için oluşan elektrik alan doğrudan bu elektrostatik potansiyele ve tükenme bölgesi genişliğine bağlıdır. Yapısal potansiyel de

$$V_{bi} = -\int_{-x_p}^{x_n} \mathcal{E}(x) dx \quad (2.9)$$

eşitliğine bağlı olarak değişir. 2.6, 2.7, 2.8 ve 2.9 denklemlerinin her biri ayrı çözüldüğünde

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) V_{bi}} \quad (2.10)$$

olur. Eğer $N_D \gg N_A$ ise, n-bölgesindeki tükenme bölgesi, p-tarafından çok daha küçük olacaktır ($x_n \ll x_p$). Bu durumda

$$W \cong x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A} V_{bi}} \quad (2.11)$$

eşitliği elde edilir [27]. 2.11 ifadesi fiziksel olarak tükenme bölgesinin tamamının p-türü bölgeye ait olduğunu söyler. n-bölgesi ise çok daha küçük ancak daha yoğundur. Bu tip eklemlere *tek taraflı keskin eklemler* adı verilir ve katkılanan iyonlara göre p-n+ veya n-p+ olarak gösterilirler [27].

Bu tezde silisyum örgüye iki serbest elektron veren selenyum iyonları miktarı, altaşa önceden katkılanmış olan bor iyonları miktarından çok daha yüksektir. Bu yüzden p-n+ eklemi oluşturulduğunu söylemek mümkündür.

2.4 AŞIRI KATKILAMA

Yığın yarıiletken denge dışı yoğunluklarda (non-equilibrium concentrations) derin seviye katkılarlarına aşırı katkılama adı verilir [29]. Katkılama miktarı malzemenin iletkenlik [30], [31], optik soğurma [32], [33] gibi fiziksel özelliklerini değiştirebilen bir işlemdir. Örnek vermek gerekirse, silisyum altaşların bor, arsenik veya fosfor katkılama miktarları arttıkça özdirençleri azalmaktadır [34]. Her katkılama, bir safsızlık enerji seviyesi oluşumuna sebep olur [27]. Yarıiletken içinde bu yeni harici enerji seviyeleri ile de Fermi seviyesinin değiştirilmesi mümkündür.

Katkılanan iyonların türü ve miktarına göre malzemenin yasak enerji aralığında oluşan yeni enerji seviyelerinin sıklığı değişir ve buna bağlı olarak elektronların yasak bant aralığındaki hareketinde değişiklikler meydana gelir. Bu da katkılanan malzemenin farklı foton enerji değerlerinde farklı şekillerde davranmasını sağlayacaktır. Örneklemek gerekirse: Silisyum yasak enerji aralığı 1,1 eV'dir. Eğer silisyum örgüye donör iyonlar katkılanacak olursa, harici enerji seviyeleri bağlı elektronların daha düşük enerjili fotonların sayesinde de iletkenlik bandına geçişini sağlayacaktır.

2.4.1 Ara Bant (IB) Modeli

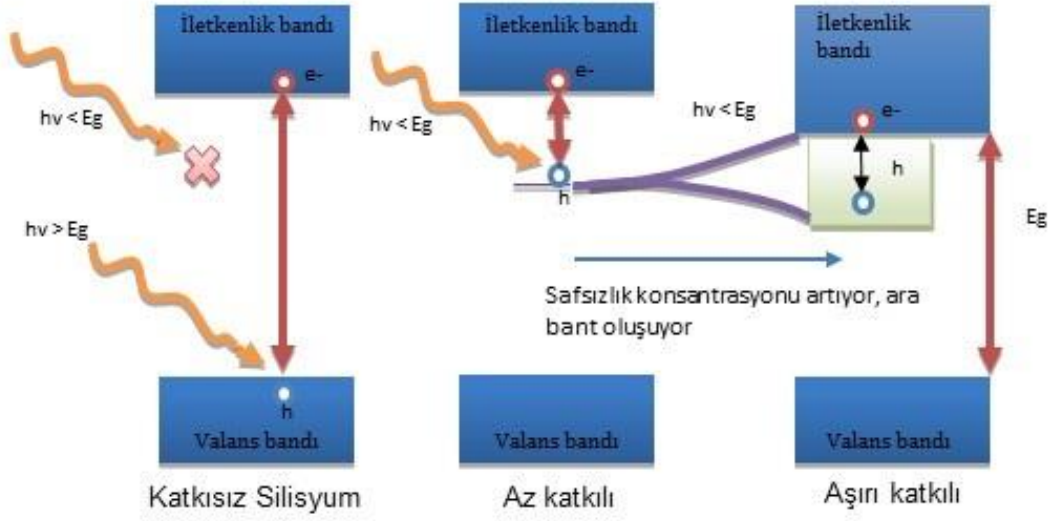
1961'de, tek eklemler malzemelerden yapılan güneş gözellerinden elde edilecek verimliliğin en fazla %30 olabileceği Willam Shockley ve Hans Joachim Queisser tarafından ortaya konmuştur [12]. Yine, safsızlık iyonları sayesinde safsızlık iletkenliği [35] ve ara enerji seviyelerinin bir bant oluşturacağı ve bu bantın genişliği hakkındaki

çalışmalar [36], [37] 1960'lı yıllarda pek çok bilim insanı tarafından teorik olarak çalışılmıştır. Bu harici seviyelerin oluşturduğu ara bant sayesinde yalıtkandan metale doğru bir geçiş olur. Bu geçiş *Mott geçişi* olarak adlandırılır [37], [38]. 1997'de ise Antonio Luque ve Antonio Martí, ara bant sayesinde tek eklemli yapılarda Shockley – Queisser (SQ) limitinin oluşacak yeni ara bant sayesinde aşılıarak güneş gözesi verimliliğinin %63'e varacağını ortaya koymuşlardır [15]. 2002'de ise Andrew S. Brown ve Martin A. Green, bu verimlilik teorik üst limitini %77,2 olarak belirlemişlerdir [39].

IB geçişlerinde yarıiletken malzemede, esas malzemenin yasak enerji bant aralığı enerjisi kadar enerjiye ve dalga boyuna sahip fotonlar ancak değerlik bandından (valence band – VB) iletkenlik bandına (conduction band – CB) bağlı bir elektronun uyarılmasını sağlayarak bir elektron – boşluk çifti oluşturabilir ve bir fotoakım yaratılmasını sağlayabilirler [11]. Yasak enerji aralığında safsızlık iyonlarının yarattığı enerji seviyeleri de elektron – boşluk çiftinin oluşması ve yeniden birleşmesinde yardımcı olabilir.

Safsızlık iyonlarının katı malzemede çözünübilirlik limiti 10^{16} iyon.cm⁻³ kadardır ve bu limitin üzerinde denge dışı bir katkılama durumu olur [40], [41]. Bu safsızlık iyonlarının daha da artırılarak belli bir limitin üzerinde esas yapıya katkılanmaları hâlinde, kusurlardan gelen bu seviyeler birbirlerine çok yaklaşarak bir yeni bir bant oluştururlar. Bu seviyelerin sıklığı sayesinde burada bir ara bant (intermediate band – IB) adı verilen yeni bir bant oluşur [11]. Bu limit **Mott limiti** olarak adlandırılır ve Silisyum için 6×10^{19} atom.cm⁻³ olarak literatüre geçmiştir [42]. Daha önce yapılmış teorik hesaplara göre, safsızlık iyonu Se olduğunda, 1023 adet Si atomunda bir safsızlık Se iyonu bulunması halinde (Se₁:Si₁₀₂₃) ara bant oluşmaya başlamaktadır [41]. Safsızlık oranı arttıkça kusur konsantrasyonu artacak ve bu bant büyüyecektir. Katkılama, Se₁:Si₂₄₉ olacak şekilde artırılacak olursa oluşan IB, iletkenlik bandının alt kenarına dokunacak kadar büyür [41]. Se₁:Si₁₂₇ yoğunluğuna kadar artırılırsa ki bu takriben %1'e yakınsamaktadır, IB ve CB tamamen iç içe geçecek şekilde birleşirler [41]. Bu bir noktada CB'nin büyümesi anlamına gelir (Şekil 2.7) [41], [43].

Yasak enerji aralığında yeni bant oluşması ile ise, daha düşük enerji seviyelerinde gelen fotonlar VB'den IB'ye, IB'den de CB'ye birer geçiş sağlayarak bir fotoakım yaratabilirler [37]. Bu durum yarıiletkenin kendi yasak enerji aralığında banttan banda (VB – CB arası), daha uzun dalga boylarında da IB geçişleri destekli geçişler olarak görülmektedir (Şekil 2.7).



Şekil 2. 7: (a) Katkısız esas yarıiletken (b) Harici seviyelerden bantın oluşmaya başlaması, (c) ara bant oluşuktan sonra yük taşıyıcılarının geçişi (Jeffrey Warrender "Black Silicon for Next-Generation Infrared Sensors" sunumundan uyarlanmıştır).

Harici enerji seviyeleri yasak bant aralığında birer ışına yapmayan yeniden birleşme (non-radiative recombination – NRR) merkezi olarak davranırlar da, yeni oluşan ara bant ve IB geçişleri birer yeniden birleşme merkezi olarak davranmazlar. Harici seviyeler bir bant şeklinde davrandığı için NRR merkezleri yok olur ve taşıyıcı ömründe bir kısalma olmaz. [44]–[47]. Dolayısıyla verimli bir şekilde uzun dalga boylu fotonlar da bir elektron – boşluk çiftleri akıma katkıda bulunabilirler.

2.4.2 İyon Yerleştirme

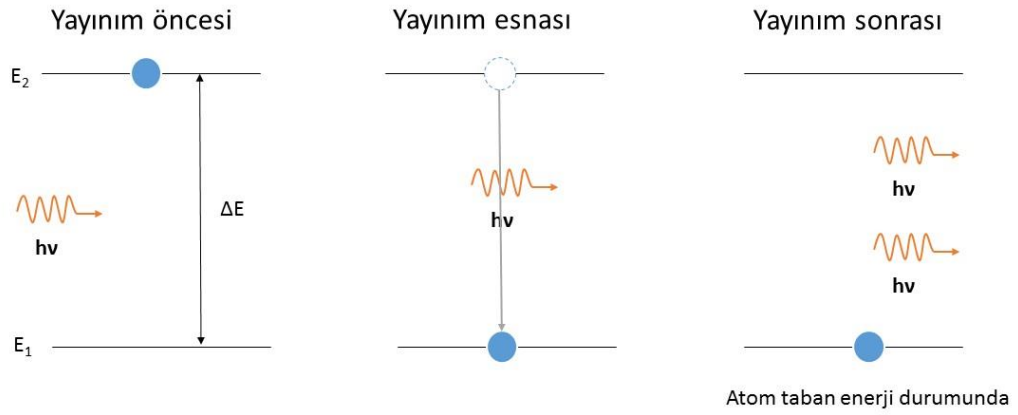
Lineer hızlandırıcı altında iyon implantasyonu yolu ile katı çözünebilirlik limitinin üzerinde yapılan katkılamalarda, safsızlık iyonları elektriksel olarak aktif değillerdir ve bu yerleştirilen iyonların aktive olabilmesi için ısıtma veya lazer ile yerel eritme gibi bir takım işlemler gerekmektedir [33].

İyon yerleştirme işlemi, safsızlık iyonlarının güçlü bir elektrik alan altında hızlandırılarak, katı fazda bulunan alt taşa yerleştirilmesi ile mümkün olan bir tekniktir. İlk kez Rutherford tarafından 1906’da α parçacıklarını hızlandırarak alüminyum içinden geçirmesi milat kabul edilir [34], [35]. İyon yerleştirme işlemi, yarıiletken teknolojisi için temel bir işlemdir ve bu yolla yerleştirilen safsızlık iyonları ile yarıiletken malzemelerin elektriksel veya optik özellikleri gibi fiziksel bir takım özellikleri değiştirilebilir [35]. İyon yerleştirmede önemli olan temel parametreler, yerleştirilecek iyon türü,

yerleştirilecek iyonun miktarı, uygulanacak olan ivmelendirme kuvveti ve alt taş malzemenin ne olduğu, uygulanan enerjinin ve iyonların yüzeyde ne gibi değişikliklere yol açtığı gibi parametrelerdir [35], [36].

2.4.3 Nanosaniye Atımlı Lazer Operasyonu

Lazer (light amplification by stimulating emission radiation – LASER) eş fazlı (koherent) olduğu için yüzeyle etkileşime girebilecek bir ışımadır (Şekil 2.8).



Şekil 2. 8: Lazer ışınmasını oluşturan uyarılma ışınması

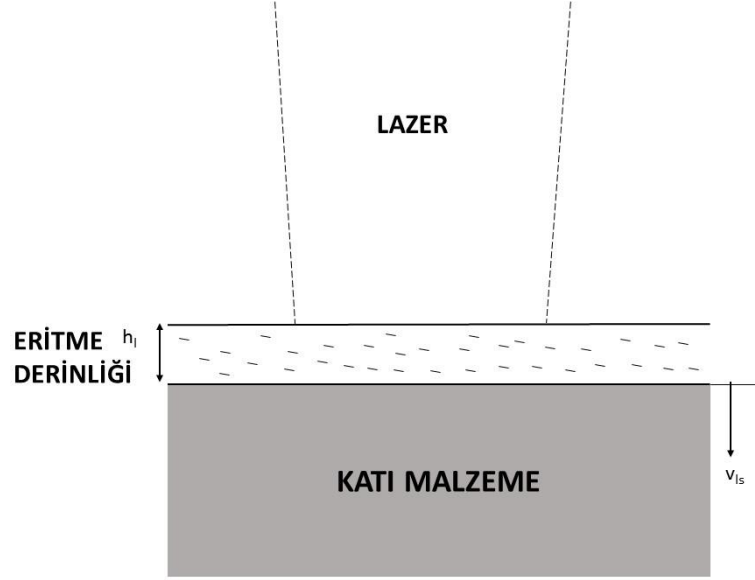
Bu ışınma malzeme herhangi bir malzeme yüzeyine geldiğinde çok hızlı yüzeyi eritebilecek, hatta yüzeyde tahribat yapabilecek bir güce sahiptir.

Lazer, eş fazlı olduğu için, dağılmadan uzun mesafeler kat edebilme özelliğine sahiptir. Odaklandığı noktada ise fiziksel ve kimyasal olarak katı malzeme yüzeyi ile etkileşime geçebilme becerisi vardır.

Bazı lazerlerin ışık yayma süreleri oldukça kısadır. Kısa süreli ışık yayınımının ardı ardına tekrarlanması ile lazer atımlı bir şekilde çalışmış olur. Nanosaniye atımlı lazerlerin atım süreleri o kadar kısadır ki, anlık bir şekilde yüzeye enerji verebilirler. Atımlı lazerlerin yüzeye olan etkileri verdikleri enerjiye göre ağırlıklı olarak *yüzey eritme (heterojen eritme)* [48] veya bir yüzey kaldırma işlemi olan *ablasyon* [49], [50] olarak sınıflandırılabilir.

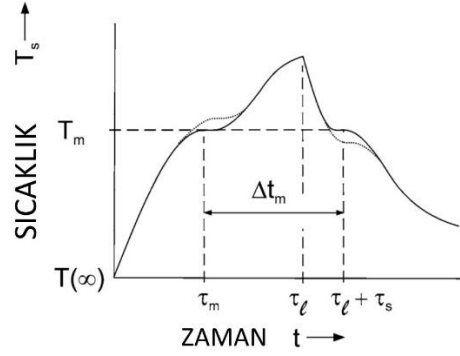
Yüzey eritme, atımlı lazerle tahribat eşik değerini geçmeyecek enerji yoğunluğunda yüzeye lazer atımı göndererek, silisyum yüzeyini, birkaç yüz nanometrelik bir derinliğe

kadar çok hızlı bir şekilde eritip, yine çok hızlı bir şekilde soğumasını sağlayan bir işlemdir (Şekil 2.9). [17], [48], [51]. Burada atım, lazerin tepe gücünün daha yüksek olmasını sağlamaktadır [48].



Şekil 2. 9: Lazerle yüzey eritme şeması [48]

Zira atımlı lazerlerin atımlarındaki tam genişlikte yarı maksimum (full width half maximum –FWHM) yüzeye aktarılan enerjiyi ve lazer demetinin yüzeye ne şekilde etkileşeceğini belirleyen temel parametrelerden biridir [48]. Atımın süre cinsinden (nanosaniye –ns) genişliğine bağlı olarak yeniden aynı mertebede soğuyacak ve yeniden katılacaktır. Erimenin yalnızca yüzeye ve lazer demetinin malzeme yüzeyindeki genişliği ile sınırlı olduğu ve silisyumun katılma hızı göz önüne alındığında bu durum, yüzeye ekilmiş katkı iyonlarının yüzeyden buharlaşmadan kristal örgüye dâhil olmuş bir katman halinde n+ tabakasını oluşturmasını sağlar. Şekil 2.10’da nanosaniye atımlı lazerin yüzey eritmesi için geçirdiği evreler verilmiştir [48].



Şekil 2. 10: Nanosaniye atımlı lazer operasyonunda tek atım için yüzey erimesi ve yeniden katılaşması için geçen süre diyagramı [49]

Şekil 2.10’da verilen diyagramda τ_ℓ atım süresi (pulse duration), τ_m silisyumun erime sıcaklığına gelmesi için gereken zaman, τ_s silisyumun yeniden katılaşması için geçen süre, T_m erime sıcaklığı, Δt_m ise erime için geçen süredir [48]. Burada lazerin yüzeyi çok kısa süreli eritmesi ve çok hızlı donmasının yanı sıra lazerin yerel eritme becerisinden de faydalanılmaktadır. Yerel eritmenin en büyük faydası yüzeyin küçük adım farkları ile homojen bir şekilde işlenebilmesidir. Bu noktada iyon yerleştirilmesi veya çeşitli nedenlerle amorflaşan yüzey yeniden kristalize edilmekte, ayrıca yüzeye ekilen iyonlar ev sahibi silisyum atomlarının yerine geçmekte ve donör özelliklerinden dolayı ortama serbest elektron vermektedirler. Bu da bir mümkün mertebe homojen bir p-n+ eklemi yaratılması için büyük yarar göstermektedir.

2.5 DEDEKTÖRLER

Yayılan gerek görünür, gerekse kızılötesi ışığı algılayarak bir elektriksel sinyale çevirebilmek için, dedektörler kullanılmaktadırlar. Kızılötesinde çalışan dedektörler temel olarak ısıl (termal) dedektörler ve foton dedektörleri olarak iki başlıkta incelenirler.

2.5.1 Termal Dedektörler

Termal dedektörler üzerlerine düşen ışığın enerjisinin üzerlerinde sıcaklığı değiştirmesi prensibine dayalı çalışırlar. Bu sıcaklık değişimi ise bir takım fiziksel veya elektriksel özelliklerin değişiminin işlenmesi sayesinde gözlenir [24]. Termal dedektör türleri aşağıdaki etkilere göre sıralanabilirler:

2.5.2.1 Bolometrik Etki

Gelen ışımanın etkisiyle dedektörün içindeki metalin sıcaklığı değişir, dolayısı ile direnci değişir. Bolometreler bu direnç değişimine bağlı olarak bir algılama yaparlar [24], [52].

2.5.2.2 Termovoltajik etki

Farklı metallerin eklemesi ile gelen ışımanın bu eklemesinin sıcaklığının değişmesi ve buna bağlı olarak da eklemde bir gerilim yaratılması ile algılama meydana gelir [24], [53].

2.5.2.3 Termopnömatik etki

Gelen radyasyon, odanın içindeki gazın sıcaklığını ve basıncını, ince, esnek ayna şeklindeki duvarlara çarpma suretiyle artırır. Bu ayna şeklindeki duvarlara çarpma derecesi, optik olarak ayrı bir sistem ile dedekte edilir [24].

2.5.2.4 Piroelektrik etki

Gelen kızılötesi radyasyon, kristal tepkisel elementin sıcaklığını artırır. Bu sıcaklık değişimi, dipol momentlerin altere olmasına ve gözlemlenebilir bir harici elektrik alan yaratılmasına neden olur [24], [54].

2.5.2 Foton Dedektörleri

Foton dedektörleri veya fotodedektörler ise üzerlerine düşen fotonların, elektron – hol çiftleri yaratması sonucunda bir fotoakım yaratarak ışığı algılama becerisi olan dedektörlerdir. Fotodedektörler, üzerlerine gelen fotonların, malzemenin bağlı bulunan taşıyıcıların bu enerji ile uyarılarak iletkenlik bandında serbest hareket etmesi sayesinde bir akım yaratması ile oluşur. Bu oluşan akıma **fotoakım** adı verilir.

Fotodedektörler, gelen fotonun enerjisinin malzemenin yasak bant aralığından (E_g) büyük veya o bant aralığının enerjisine eşit olması ile uyarılabilirler ve bu **fotouyarılma** ile elektron – deşik çiftleri oluştururlar. Bir algılama yapılabilmesi için bir fotoakım oluşması beklenir.

Foton dedektörleri birkaç farklı koşul altında çalışabilirler.

2.5.2.1 Fotovoltaik (PV) etki:

Taşıyıcıların, üzerlerine ışık düştüğü zaman malzemedeki taşıyıcıların iletkenlik bandına çıkarak bir elektron – boşluk çifti oluşturması ile malzemede bir potansiyel fark oluşturması fotovoltaik etki olarak adlandırılır [24].

2.5.2.2 Fotoiletken (PC) etki:

Fotoiletken malzemenin üzerine düşen foton miktarındaki değişim malzemedeki serbest yük taşıyıcılarının sayısında bir değişime neden olurlar. Yarıiletkenin elektriksel iletkenliği burada doğrudan serbest taşıyıcıların sayısı ile orantılıdır. Fotoiletken dedektörler, fotovoltajik dedektörlerin aksine ışığın üzerlerine düşmesi ile bir fotoakım yaratırlar. Malzemenin elektriksel iletkenliği, burada doğrudan serbest taşıyıcıların miktarı ile orantılıdır [24].

PC dedektörler ve PV dedektörler, fotodedektör teknolojisinde en yaygın kullanılan dedektör türleridir. PC dedektörlerin iletkenlikleri görece daha zayıftır ve iletkenliklerini fotonlarca üretilmiş taşıyıcılar sayesinde arttırabilirler. Işığın, yeterli miktarda yüksek enerjisi aygıtta girdiği takdirde fotonlar, bağlı elektronları iletkenlik bandına gönderebilmek için yeterli enerjiyi aktarabilirler. Fotonların yarattığı taşıyıcılar, elektriksel iletkenliği harici bir devreye aktarmak amacıyla yüzeye atılmış iletken kontaklarına ileterek aygıt direncini düşürürler. PV dedektörlerin temel çalışma prensibi ise gelen fotonların aygıtta bir elektromotor kuvvet yaratması ile mümkün olur [24]. Bu elektromotor kuvvet bir akım ve gerilim yaratır [24].

2.6 BAŞLICA KULLANILAN DEDEKTÖR TÜRLERİ

Kızılötesi dedektörlerin başlıca istenen özellikleri arasında tepkiselliğinin ve tepki hızının yüksek olması, bu şekilde istenen bant aralığında net bir şekilde hareket eden varlıkların görüntüsünün elde edilmesi istenmektedir. Bu ihtiyacı karşılayan, yaygın kullanılan dedektörlerden bazıları şunlardır:

2.6.1 HgCdTe (MCT) Dedektörler

HgCdTe yapılı bir başka deyişle MCT dedektörler, 77 K sıcaklıkta 1 – 12 µm arası çalışan soğutmalı kuantum kuyu kızılötesi fotodedektör (QWIP) türü dedektörlerdir. Genel olarak MWIR ve LWIR bölgelerinde referans olarak kullanılırlar. Genellikle moleküler demet katmanlaması (MBE) ile büyütülürler. Çinko harman yapıdadırlar [55]. İlk kez 1959 yılında HgTe ve CdTe kristallerinin birlikte büyütülmesi mantığından yola çıkılarak Lawson vd. tarafından ortaya konmuştur [19], [56]. Sıvı azot sıcaklığında MWIR ve LWIR bölgelerinde yüksek algılayabilirlik değerlerine sahiptirler [19].

2.6.2 InSb Dedektörler

İndiyum antimoni (InSb) dedektörler, 77 K sıcaklıkta 1 – 5,5 μm arası çalışan dedektörlerdir [57]. İlk kez 1954 yılında optik ve fotoelektriksel özellikleri ortaya konmuştur [58]. Yüksek hassasiyete sahiptirler ancak üretimi için yine MBE kullanılmaktadır. MWIR bölgesinde yüksek verimliliğe sahiptir.

2.6.3 PbSe Dedektörler

PbSe dedektörler, 280 K sıcaklıkta SWIR bölgesinde (1 – 3,3 μm), 77 K sıcaklıkta ise MWIR bölgesinde de (1 – 5,2 μm) çalışabilen ve duyarlılıkları da InSb dedektörlere göre daha düşük olan dedektörlerdir [57].

2.6.4 InGaAs Dedektörler

InGaAs dedektörler oda sıcaklığında (0,9 – 1,9 μm) veya termoelektrik soğutma ile çalışabilen (0,9 – 2,6 μm) dedektörlerdir. SWIR bölge için referans oluşturabilen dedektör tipidir. Tepkiselliği kayda değer olmakla beraber ($\sim 1,2$ A/W) MCT, InSb veya bu tezin konusu olan dedektörle karşılaştırıldığında oldukça dar bir spektrumda çalışmaktadır.

2.6.5 Germanyum (Ge) Dedektörler

Germanyum, bant aralığından dolayı soğutmasız olarak, 0,8 – 1,7 μm aralığında çalışabilen bir dedektör tipidir. NIR/SWIR bölgede becerikli ve performanslı çalışabilmektedir. Ancak germanyum, sık bulunan bir element olmadığı gibi, dar bir spektrumda çalışabilmektedir.

2.6.6 Silisyum (Si) Dedektörler

Silisyum, yer kabuğunda çok bulunan bir element olduğu için maliyeti düşük, aynı zamanda optoelektronik özellikleri bir dedektör yapımı için oldukça uygun olan bir elementtir. Fotonik aygıt teknolojisinin önemli bir ayağın oluşturmakta olup, element bazında diğer fotodiyotlardan ayrı olarak, kendine ait bir başlığa sahiptir. Salt pn eklemi silisyum, dar bir spektrumda çalışmaktadır ve referans silisyum fotodiyotlar 0,7 A/W tepkisellikle çalışmaktadırlar. Tepki gösterdiği spektrum 0,4 – 1,1 μm aralığındadır. Bu aralıktan sonra gelen fotonlara karşı geçirgen ve tepkisiz davranır. Soğutulduğu takdirde ise tepkiselliği daha da düşmektedir.

2.6.7 Siyah Silisyum (b-Si) Dedektörler

Siyah silisyum, silisyumun farklı bir varyasyonudur. Çoklu iç yüzey yansımaya sayesinde yüzeyine gelen ışığın tamamına yakınına içinde tuzaklayarak, gelen tüm fotonların bir elektron – deşik çifti oluşturmasını sağlayarak kuantum verimi artırma prensibine bağlı olarak çalışırlar. Bu da A/W veya V/W cinsinden elde edilen tepkiselliği çokça artırır. Siyah silisyum, aşırı katkılama ile ara bant oluşumu yoluyla daha uzun dalgalarda algılama da yapabilir.

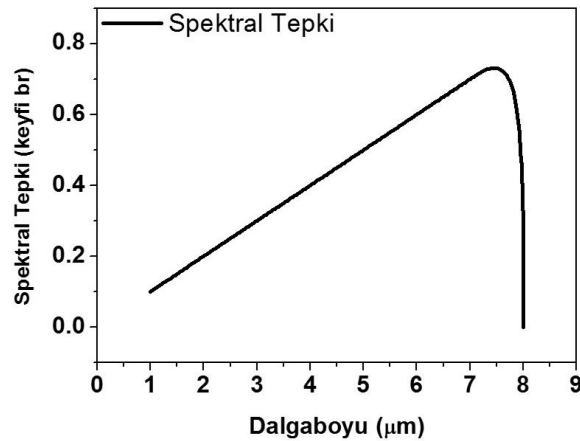
Siyah silisyum fotodedektörlerin ayrıca tepkiselliği de standart fotodiyotlardan çok daha fazladır. Harvard Üniversitesi'nde yapılan çalışmalarda, görünür bölge için 940 nm dalgalarda 20 A/W üzerinde fototepki elde edilmiştir [59].

2.7 BAŞARI ÖLÇÜTLERİ

Aygıtların yeterli şekillerde çalışıp çalışmadığını anlamak için bir takım ölçütler kullanılmaktadır. Bunlar başarı ölçütleri (figures of merit) şeklinde adlandırılırlar. Bu ölçütler aygıtın spektral tepkisi veya tepkiselliği, tepe tepkiselliği, kuantum verimi, spesifik dedektivitesi, karanlık akımı gibi değerlerdir.

2.7.1 Spektral Tepki

Bir aygıtın elektromanyetik spektrumda hangi aralıkta tepki verdiğini görebilmek için yapılan ölçümdür. Mikrofabrikasyonu yapılan aygıtın ilgili elektriksel bağlantıları yapılarak kızılötesi bölgede FTIR, görünür bölgede ise monokromatör ile ölçümü yapılır. İdeal bir fotodiyotun spektral tepkisi Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2. 11: İdeal fotodiyot tepkiselliği (kesilim dalgalı boyu rastgele verilmiştir) [60]

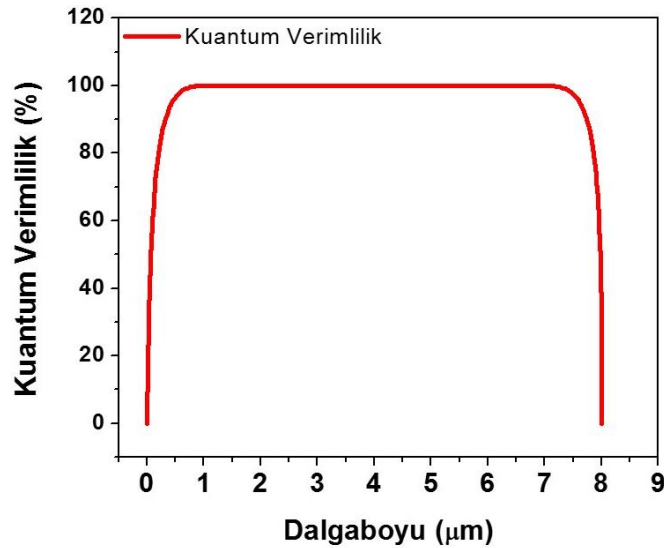
2.7.2 Tepkisellik

Bir fotodiyot üzerine düşen optik güç başına fotodiyotta yarattığı akımın en yüksek değeridir ve A/W veya V/W cinsinden ölçülür.

2.7.3 Kuantum Verimliliği

Kuantum verim, $h\nu \geq E_g$ olduğunda aygıt yüzeyine düşen toplam foton sayısının akıma katkıda bulunan elektron – deşik çifti sayısıdır. Eğer gelen her bir foton bir elektron – deşik çifti oluşturacak olursa, bu aygıtın kuantum verimi %100 olur (Şekil 2.12).

Bazı zamanlarda kuantum verim %100'ün üzerine çıkabilir. Bu, gelen bir fotonun birden fazla elektron – deşik çifti oluşturduğu anlamına gelir. Buna **çoklu eksiton oluşumu (multiple exciton generation)** adı verilir [61], [62]. Ara bant oluşan yapılarda değerlik bandındaki elektronların iletkenlik bandına taşınımı ara bant aracılığıyla kolaylaştığı için bu etki ara bantlı yapılarda görülmektedir. İdeal bir fotodiyotun kuantum verimliliği Şekil 2.12'te verilmiştir.



Şekil 2. 12: İdeal fotodiyotun kuantum verimliliği (kesilim dalgaboyu rastgele verilmiştir).

2.7.4 Karanlık Akım

Fotodiyot veya fotoaygıtlar üzerlerine ışık düştüklerinde bir akım üretirler. Fakat kristal örgü, elbette sıfır Kelvin üzerinde bir sıcaklıkta olduğu için, örgüdeki atomlar veya iyonlar bir takım titreşimlere sahiptirler. Bu titreşimler sonucu üzerlerine karanlıkta da bir kaçak akım üretilmesine sebep olur. Bu kaçak akımlar aygıtın –gerçekte istenen-

fotoakımında gürültüye neden olurlar ve aygıtın verimini düşürürler. Bu nedenle bu akımın mümkün olduğunca düşük olması istenir [63], [64].

2.7.5 Spesifik Dedektivite (D^*)

Bu ölçüt, tepkisellik ve karanlık akım ölçütlerinin bir birleşiminden meydana gelir. Aygıtın ölçüm yapılan bant aralığında gürültü ile ters orantılıdır. Birim alanda ve Δf bant aralığında gelen akımın ne kadarının sinyal ne kadarının gürültü olduğuyla ilişkilidir.

$$D^* = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{NEP} = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{\phi} \cdot \frac{I_{sinyal}}{I_{gürültü}} = R \cdot \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{I_{gürültü}} \quad (2.3) \quad [60], [64]$$

ile verilir. A_d , dedektörün aktif alanı, Δf bant aralığı, $I_{gürültü}$ gürültü akımı, R ise V/W veya A/W cinsinden tepkiselliktir. D^* birimi ise $\text{cm.Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ veya Jones olarak verilir [60], [64].

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

3.1 İYON YERLEŞTİRME

Bir bilgisayar programı olan *The Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM)* katkı iyonlarının alt taşlara hangi dozlarda ve miktarlarda yerleşebileceğini deneysel çalışan fizikçilere ve mühendislere sunan, James F. Ziegler'in yazmış olduğu ve ücretsiz sunulan bir Monte Carlo simülasyonu programdır. Bu programa göre öncelikle durdurma ve menzil tabloları (*Stopping and Range Tables*) incelenerek hangi derinlikte iyon yerleőtirmek isteniyorsa, o derinliğe ne kadar enerji uygulanması gerektiği bulunmalıdır [65], [66].

Yüksek enerjili iyonların bir malzeme içinde istenen koşullarda durması meselesi 20. yy boyunca, gerek teorik, gerek deneysel çalışan fizikçilerin önemli bir kısmının merak ettiği bir konu olmuştur [66].

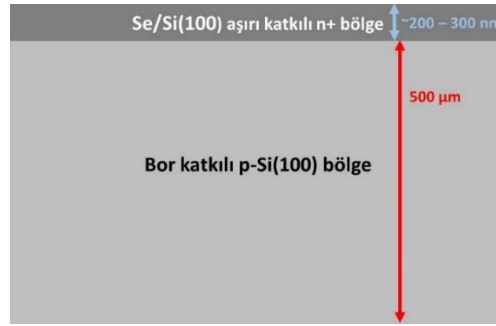
$2 \times 2 \text{ cm}^2$ p-türü ve $\langle 100 \rangle$ yönelimli silisyum alt taşların parlak yüzeyine (bor katkılı, $\rho = 1 - 10 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$, $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 500 nm) Helmholtz Zentrum Dresden – Rossendorf (HZDR, Dresden, Almanya) merkezinde, lineer hızlandırıcıda 150 keV enerji altında Se iyonları gönderilerek iyonların yüzeyin ortalama 300 nm derinliğine kadar yerleşmesi sağlanmıştır. İlk Si(100) alt taşın bu derinliğe kadar olan yüzeyi, katkı iyonlarının yerleştirilmesi amacıyla yüzeye silisyum iyonları bombardıman edilerek amorflaştırılmıştır [31], [67]–[70]. Daha sonra ise $\sim 1 \times 10^{20} \text{ atom} \cdot \text{cm}^{-3}$ Se iyonu numuneye yerleştirilmiştir (örnek yüzeyinde $\sim 1 \times 10^{15} \text{ atom} \cdot \text{cm}^{-2}$).

3.2 ATIMLI LAZER OPERASYONU

3.2.1 Yüzey Eritme

Nanosaniye mertebesinde veya daha kısa süreli lazerler çok kısa süreler için yüzeyi eritecek kadar enerjiyi yüzeye verip çok hızlı bir şekilde yüzeyi eritirler. Eriyen yüzey çok hızlı bir şekilde (nanosaniyeler içinde) soğur [48]. Bu olay, yüzeyin hızlı yeniden katılaşması (rapid resolidification) olarak adlandırılır [31], [48], [71]. Bu işlem, yüzey homojenizasyonu [72], [73], düzlemlenme [74]–[76], mikroyapı saflaştırması [77], [78], cam oluşturma, porlu malzemelerin porlarının kapatılması, bazı malzemelerin yüzeylerinin sertleőtirilmesi [79], [80], alaşım oluşturma [81], [82], lazer sinterleme [83]–[85], lazer kaynaklama [86]–[88], lazer destekli aşındırma [89]–[91] veya katkılama

[92]–[94] gibi pek çok uygulama için elverişli bir yöntemdir [48]. Heterojen eritme ve yeniden katılaşma sürecinin başlıca iki önemli noktası vardır: İlk olarak alt taş iyonları ile yüzeye yerleştirilen iyonlar arasında yüzeyin yüzey anlık bir şekilde eritilerek iyonların birbirleriyle bağ kurması sağlanır. Böylece çözünübilirlik limitinin çok üzerinde yerleştirilen iyonlar kayıp vermeden aktive alt taş iyonları ile bağ kurabilir ve aktif hâle geçerler [3]. Bu denli kısa bir süre içinde katı – sıvı ara yüzünde termodinamik denge kurulamayacağı için katkı iyonları katı silisyum içinde difüzlenecektir ve bu şekilde bir sıg katmanlı **p-n+** eklemi kurulması sağlanır [17], [95]–[97]. Buradaki sıg katman kalkojen katkılı n+ katmanıdır (Şekil 3.1).

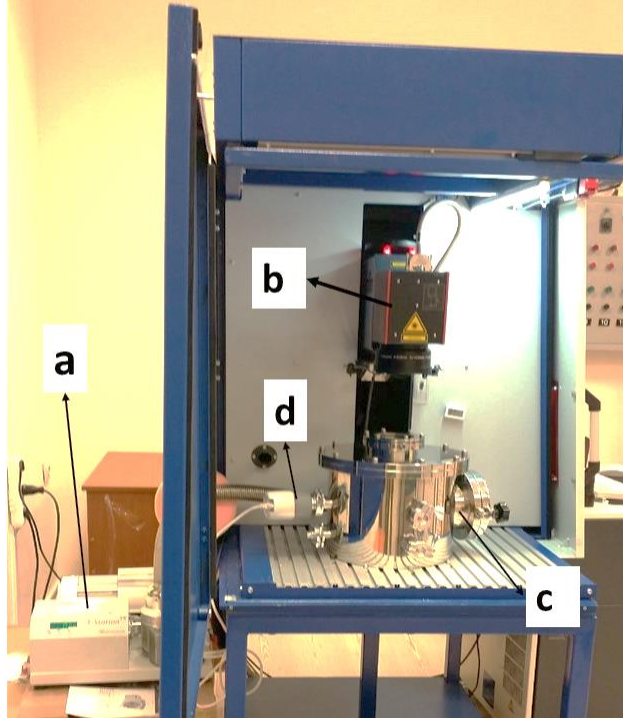


Şekil 3. 1: Sıg katmanlı Se/Si(100) p-n+ yapısı (çizim ölçekli değildir).

İkinci önemli basamağı ise, katkı iyonlarının yüzeye yerleştirilmesi sırasında lineer hızlandırıcıdan gelen iyonların yüzeye çarpma momentumundan dolayı amorflaşan yüzeyin hızlı yeniden katılaşma ile yeniden alt taşın kalan kısmı yapısında kristalize olmasının sağlanmasıdır [98]–[100].

Nanosaniye mertebesinde atımın tam anlamı, kısa bir miktar gönderilen ışığın gönderim süresinin nanosaniye mertebesinde olmasıdır. Bu da gönderilen Gaussyen atımın $1/e^2$ genişliğine kadar olan kısmının (bu kısım süre olarak ölçülür) nanosaniye mertebesinde olması demektir. Atımlı lazer ve atım süresi, lazerin yapıldığı malzemenin bir özelliğidir. Nanosaniye mertebesindeki bu kısa atımlar ise, Nd:YAG katı hal lazeri yapısının bir özelliğidir.

Hacettepe Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Lazer Laboratuvarı'nda bulunan Rofin Powerline E20 SHG PV nanosaniye atımlı lazer, 532 nm dalgaboyu ışık gönderen bir lazerdir. Atım frekansı ise 15 – 200 kHz arasındadır ve yarıiletken malzemelerin yüzey işlemleri için özel olarak tasarlanmıştır.



Şekil 3. 2: Atımlı lazer ekipmanı (a) Turbo moleküler vakum pompası, (b) Nd:YAG SHG atımlı lazer, (c) vakum odası, (d) vakum kazanı elektriksel bağlantıları (gauge)

Nanosaniye atımlı lazer ile amorf silisyum kristallendirmesi amacıyla, gerçek örneklerin sınırlı miktarda bulunması sebebiyle, Hacettepe Üniversitesi Amorf Yarıiletkenler Laboratuvarı'nda PECVD'de tek tarafı Czochralski Si(100) silisyum üzerine 200 °C'de 200 nm kristal silisyum kaplandı. Bu kristal silisyum üzerine kaplanan yapıların nanosaniye atımlı lazer ile kristallendirmeleri için 15 kHz atım tekrarı, 20 µm lazer demeti çapı ile farklı enerji yoğunluklarında lazer atımları yüzeye uygulandı. Uygulanan lazer atımları aşağıdaki tabloda (Çizelge 1.) verilmiştir.

Örnek Kodu	Enerji Yoğunluğu (J/cm ²)	Atım Sayısı
aR1	0,5	1
aR2	0,8	1
aR3	1,0	1
aR4	1,2	1
aR5	1,4	1
aR6	1,5	1
aR7	1,7	1
aR8	1,8	1

aR9	2,0	1
aR10	2,3	1
aR11	2,4	1
aR12	2,5	1

Çizelge 1. Kristalizasyon yapılan a-Si örneklerin lazer eritme dozları

Örneklerin kristallendirme yapıları ODTÜ – GÜNAM karakterizasyon laboratuvarında mikro Raman spektroskopisi altında incelenmiştir.

3.2.2 Yüzey Dokulandırma

Yüzeğe atım yapan lazer demeti, bir noktadan sonra yüzeyi yalnızca eritmemekte, yüzeyde tahribat da yaratmaktadır. Silisyumun yüzey tahribatı eşiği için enerji yoğunluğu $2,3 \text{ J/cm}^2$ dir [72]. Pürüzlü yüzey, parlak yüzeye göre daha çok ışık soğuracağından, tasarlanan fotodedektörün kuantum veriminin daha yüksek olması beklenmektedir [101]. Tavlamanın amacı ise atımlı lazerin yüzeyde istenmeyen tahribatlar yarattıktan sonra az miktarda da olsa belli bir sıcaklıkta silisyum iyonlarının yeniden kaynaşarak gürültü kaynağı olarak davranabilecek mikro çatlakların onarılabilmesidir [102].

Rofin Powerline E20 SHG PV (Q-anahtarlı Nd:YAG, yarıiletken malzemeye yönelik 532 nm) katı hal lazeri ile öncelikle iyon yerleştirilmemiş p-türü Si(100) alt taşlarda 300 nm civarında derinlikte dokulandırma yapabilmek için kalibrasyon çalışması yapıldı. Daha sonra Se iyonlarının yerleştirilmiş bulunduğu örnekler, $f = 15 \text{ kHz}$ tekrarlama oranı, $\tau = 10 \text{ ns}$ atım genişliğine, $d = 20 \text{ }\mu\text{m}$ demet çapına sahip lazer demeti ile 21 J/cm^2 enerji yoğunluğu ile $\sim 300 \text{ nm}$ derinlikte dokulandırıldı. Dokulandırılan yüzeyler, lazer tarama sırasında oluşabilecek istenmeyen tahribatın giderilmesi amacıyla $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 30 dakika boyunca tavlandı.

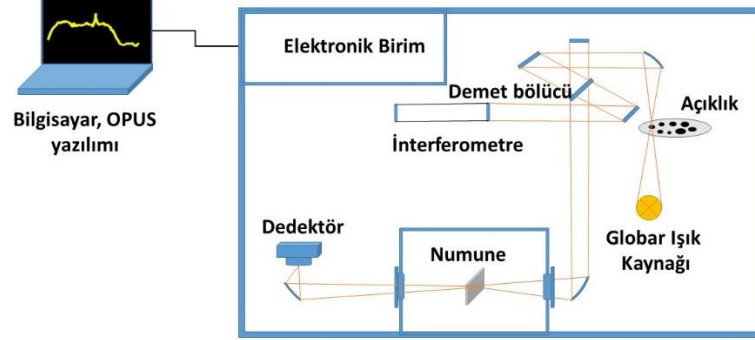
3.3 OPTİK ÖLÇÜMLER

Optik ölçüm, malzemenin geçirgenliği ve yansıtıcı özelliği hakkında bilgi alınarak,

$$A = 1 - T - R \quad (3.1)$$

eşitliği ile ne kadar ışık soğuracağı, soğurma katsayısının ne olacağı bilgisini verir. Malzemenin ışığı çokça soğurabilmesi, atımlı lazer uygulamasında belirtildiği gibi, malzemedeki elektron – boşluk çiftlerinin oluşmasını sağlar. Gelen her bir foton, bir elektron – boşluk çifti yaratacak olursa, bu %100 kuantum verime karşılık gelir.

Dolayısıyla soğurma katsayısının yüksek olması, aygıt için önem arz etmektedir (%100'den fazla kuantum verim var ise gelen bir fotonun birden fazla elektron – deşik çifti yaratıyor olması söz konusudur, bu da kazanç ile açıklanabilir).



Şekil 3. 3: Geçirgenlik ve yansımada ölçümlerinde aynı FTIR ölçüm düzeneği kullanıldığı için [103].

Anadolu Üniversitesi Nanoboyut Laboratuvarında Bruker Vertex 80v Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi (FTIR) ile iyon yerleştirilmemiş çift tarafı parlatılmış Si(100), iyon ekimi yapılmış ve lazerle taranmış örneklerin, görünür (VIS), yakın kızılötesi (NIR), orta dalga kızılötesi (MWIR) ve uzun dalga kızılötesi (LWIR) bölgede geçirgenlik (T) ve yansımada (R) ölçümleri yapılmıştır. Buradan soğurma ve soğurma katsayısı hesaplanmıştır.

3.4 AYGIT FABRİKASYONU

Lazer ile yüzeyi dokulandırılmış malzemelerin, tek piksel fotodedektör haline getirilebilmesi için yüzeyde mesa adı verilen tepecik yapıları oluşturularak numunenin ölçüm yapılabilecek bir aygıt hâline getirilmesi gerekmektedir. Esasen bu mesa yapılarının her biri bir fotodiyottur. Yapının üzeri n+, taban ise p-türüdür. Mesa üstüne ve tabana teller bağlanarak fotodiyotlardan alınan elektrik sinyali ölçülür. Mesa yapılmasının amacı, birkaç yüz nanometre veya birkaç mikrometre kalınlıkta elektron – deşik çiftlerinin fotoakıma daha fazla katkıda bulunmasıdır. Alttaş kalınlığı birkaç yüz mikrometre kalınlığında olduğu için bu kalınlıkta yeterli fotoakım ölçülemez. Mümkün mertebe yüzeyden az bir mesafede aşındırma yapılarak Bunun için de yüzeyden bir miktar (birkaç yüz nanometre veya birkaç mikrometre) aşındırma yapılması gerekmektedir. Mesa aşındırması mikro/nano aygıtların elektriksel performansı için gerekli bir işlemdir.

3.4.1 Örnek Temizliği ve Doğal Oksit Kaldırma

Silisyum aygıtlara piksel fabrikasyonu yapabilmek amacıyla bir sert maske kaplanması gereklidir. İnce filmin sağlıklı bir şekilde kaplanabilmesi için ise yüzeyin mümkün olduğunca organik ve metalik kirliliklerden arınmış olması, aynı zamanda yüzeyde biriken doğal oksit tabakasının da yüzeyden kaldırılması gerekmektedir. Bu nedenle organik kirliliği kaldırmak için RCA-1 (5:1:1 – H₂O:NH₄OH:H₂O₂) ve metalik kirliliği temizlemek için ise RCA-2 (6:1:1 – H₂O:HCl:H₂O₂) kimyasal yöntemleri başlıca kalıplaşmış yöntemlerdir. Bu temizliklerin her biri yüzeyde SiO₂ oluşturmaktadır. O nedenle temizlik işlemleri arasında ve sonunda HF çözeltisi ile doğal oksit kaldırılmalıdır.

Lazerle pürüzleştirilmiş örnekler, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (Ankara), GÜNAM temiz odalarındaki ıslak tezgâhta organik kirliliğin temizlenmesi amacı ile sırasıyla RCA-1 ve metalik kirliliklerin temizlenmesi amacıyla RCA-2 kimyasal temizlikleri yapıldı. HF ile kimyasal temizlik sonrasında yüzeyde oluşan doğal oksit %5 HF'te 30 dakika bekletilerek kaldırıldı ve deiyonize (DI) su ile durulandı.

3.4.2 Si₃N₄ Sert Maske Kaplama, Fotolitografi ve Islak Aşındırma

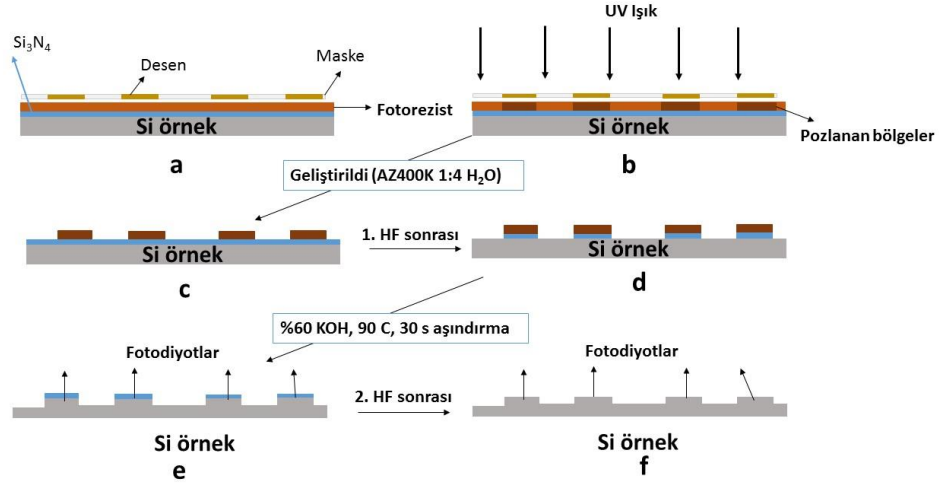
Sert maske kaplama işlemi, bir önceki maddede de belirtildiği üzere, silisyum ıslak aşındırması ile yapılacak fabrikasyonlar için gereklidir. Islak aşındırma kimyasalı olan KOH çözeltisi, aynı zamanda fotolitografide kullanılacak olan fotorezistin geliştiricisinin ana maddesidir. O yüzden silisyum aygıt fabrikasyonda yalnızca fotorezist kullanmak yeterli olmamaktadır. Çünkü konsantre KOH çözeltisi, silisyum yüzeyindeki fotorezisti hemen çözmekte, aygıt fabrikasyonu gerçekleştirilmeden yüzeyin tamamını aşındırmaktadır. MEMS fabrikasyonlarında KOH çözeltisinin aşındırmasının istenmediği bölgeler için yüzeye PECVD ile kaplanmış Si₃N₄ veya SiO₂ sert maskeleri kaplanması bilinen yöntemlerdir. Konsantre ve sıcak KOH çözeltisi karşısında Si₃N₄, SiO₂ karşısında daha uzun süre dayanabilmektedir [104]. Bu nedenle sert maske için Si₃N₄ tercih edilmiştir.

Silisyum örnekler SEMCO marka PECVD'de piksel yüzeylerini korumak amacıyla hem pürüzsüz Si yüzeylere, hem de pürüzlü numunelere silisyum nitrür (Si₃N₄) sert maske kaplandı (13.56 MHz plazma frekansı, 380 °C, 3 dakika). Si₃N₄ kalınlıkları iki yüzey için de litografi ardından %10 HF ile 2 dakika aşındırma yapılarak KLA Tencor P-6 profilometre ile ölçülmüştür.

Anadolu Üniversitesi, Fen Fakültesi, Nanoboyut Laboratuvarı'nda, 100'lük sarı oda koşullarında 5 dakika Merck marka aseton ve 5 dakika sıcak (75 °C) izopropanolde bekletilerek örnekler temizlendi, DI su ile durulandı. Temizlik sonrasında, örnek yüzeyleri mikrometre mertebesinde pürüzlü olduğu için Laurell WS-400BZ-6NPP/Lite döner kaplayıcı ile AZ5214E-IR fotorezist ile kaplama kalibrasyonu yeniden yapıldı. Kalibrasyon sonrasında 40 saniye, 2000 rpm devirde arada bir kez hafif ısıtma yapılarak (110 °C, 60 saniye), iki kez üst üste kaplandı. Sert ısıtma ile (120 °C, 5 dakika) fotorezistin çözücüsü tamamen buharlaştırıldı. MİDAS MDA-400M-6, maskeleyicide BÜDAM maskesindeki mesa deseni, 45 saniye UV ışık altında pozlanarak örneğe pozitif olarak aktarıldı. AZ400K:H₂O (1:4 oranında) geliştirici çözeltide örnekler tab edildi. KLA Tencor P-6 yüzey belirleyicide fotorezist kaplanan bölgelerin kalınlığı ve profili ölçüldü.

Siyah silisyum yapılarda ıslak aşındırma ile fabrikasyon daha önceki çalışmalarda bulunmayıp **ilk kez bu çalışmada** denenmiştir. Düzgün bir yüzeye sahip kristal silisyum yapıların mikrofabrikasyon amaçlı anizotropik aşındırması genellikle yüksek sıcaklıklı (≥ 70 °C) KOH veya NaOH benzeri alkali hidroksit kimyasalların çözeltileri kullanılarak yapılmaktadır [105]–[107]. Bu bilgilerden yola çıkılarak ıslak aşındırma pürüzlü yüzey üzerinde denenmiştir.

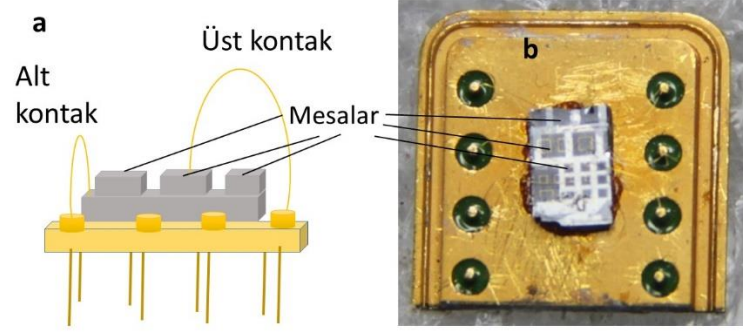
Yukarıdaki bilgilerden yola çıkılarak oda sıcaklığında %10 HF çözeltisinde 120 saniye süreyle yüzeydeki Si₃N₄ sert maske kaldırılmıştır. Mesa olarak tasarlanan yüzeylerdeki fotorezist aseton ile kaldırılmıştır ve yüzeylerdeki Si₃N₄ kalınlığı yüzey pürüzlülüğünden dolayı kabaca ölçülmüştür. Cam kaba manyetik karıştırıcı ile sıcak tabla üzerinde hazırlanan ağırlıkça %50, 90 °C sıcaklıktaki KOH çözeltisinde 10'ar saniye aralıklarla düzenli olarak aşındırılarak ve yüzey belirleyicide aşındırma derinliği gözetilerek toplamda 30 saniye aşındırılmıştır. Oluşturulan piksellerin yeniden aynı yüzey belirleyici ile yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Sonrasında ise piksel yüzeylerinde kalan Si₃N₄ sert maske, aynı HF çözeltisi ile kaldırılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3. 4: AZ5214E-IR'nin pozitif kullanımı için (a) fotorezistli yüzey üzerine maskenin yerleşimi, (b) ışınlama sonrası pozlanan bölgeler, (c) yüzeyin 1:4 AZ400K:H₂O çözeltilisinde geliştirildikten sonra elde edilen desen, (d) HF ile fotorezist dışında kalan bölgelerden Si₃N₄ kaldırılması, (e) KOH ile aşındırma sonrasında Si₃N₄'lü fotodiyotlar, (f) HF ile diyet yüzeylerindeki Si₃N₄ sert maskelerin kaldırılmasından sonra elde edilmiş olan Se/Si(100) aygıt.

3.4.3 Metal Kaplama ve Paketleme

Oluşturulan silisyum diyetlerin üzerine yeniden litografi yapılarak alt kontak deseni aktarıldı. Diyetlerin tabanına (p-Si(100)) termal buharlaştırıcıda Al (200 nm) kaplandı. Yüzeyin diğer bölgelerindeki metalin kaldırılması (lift-off) amacıyla silisyum aygıt asetonun içine atılarak 3 dakika süreyle ultrasonik titreştiricide bekletildi. Kaplanan Al metalinin yüzeyle temasının artarak ohmik karakter göstermesi amacıyla Annealsys AS-One 100 hızlı ısı tavlama (RTA) cihazında forming gaz (%3 H₂, %98 Ar), 3 dakika süreyle tavlandı. Fotolitografi ile aygıta yeniden üst kontak deseni aktarıldı. Mesa yüzeylerine ise Bilkent Üniversitesi, Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi laboratuvarlarında elektron demeti ince film kaplama cihazında Ti-Ni-Ag (20-20-200 nm) kaplandı [17], [108] ve 3 dakika yine ultrasonik titreştirici ile yüzeyin istenmeyen bölgelerindeki metal kaldırıldı. Örnekler, yeniden Anadolu Üniversitesi Nanoboyut laboratuvarında GE varnish ile her biri sekiz adet bacak içeren Veeco marka DIP paketlere yapıştırıldı, piksel yüzeylerine TPT HB16 kontak atıcı cihazda tel bağlandı ve fotodedektör ölçüme hazır duruma getirildi (Şekil 3. 5).



Şekil 3. 5: (a) Piksel oluşturulmuş ve paketlenerek ölçüme hazır duruma getirilmiş W23 Se/Si(100) örneğin şeması (b) paketlenmiş örneğin fotoğraf görüntüsü. Gri kare alanlar piksel yüzeyleri (n+), gümüşü renkli alanlar Al atılmış alt taban (p kısmı)

3.5 ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLER

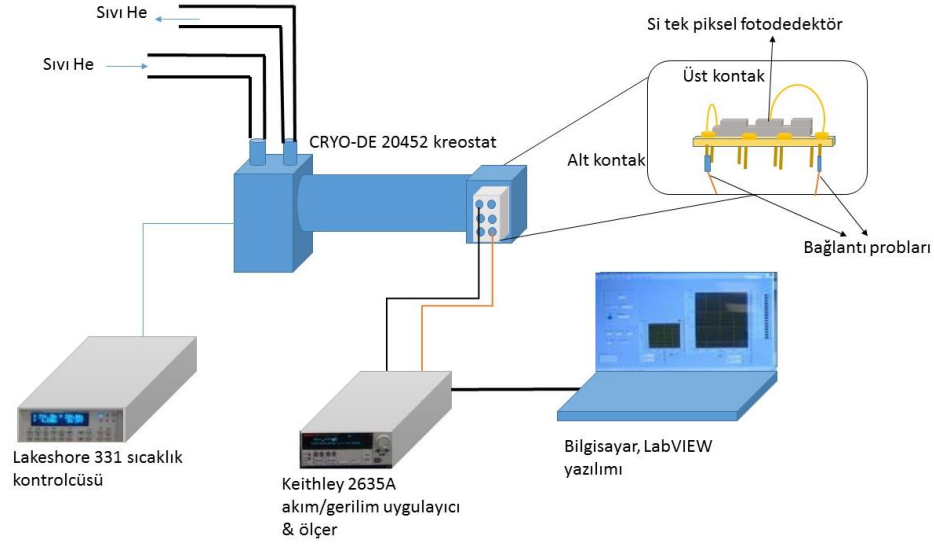
Bu kısımdaki elektriksel ölçümler karanlık ve aydınlık akım – gerilim, görünür bölge (VIS) spektral tepki ölçümü, FTIR ile kızılötesi (IR) spektral tepki ölçümü ve kara cisim ile kalibre bir şekilde tepe tepkisellik ölçümü olarak birkaç ayrı bölümde incelenecektir.

3.5.1 Karanlık Akım – Gerilim ölçümleri

Fotodiyotlar, üzerlerine ışık düştüklerinde çalışmalarına karşın, karanlıkta da kendi örgüsündeki atomların titreşimleri sebebiyle de görece düşük mertebelerde akım oluştururlar ve bu akım bir elektronik gürültü kaynağı olarak karşımıza çıkar. Bu akım türü, karanlık akım olarak adlandırılmaktadır. Karanlık akım, fotodedektör teknolojisinde, fotodiyotun algılayabilirliğini, dolayısıyla da kalitesini belirleyen temel unsurlardan biridir.

Paketlemesi yapılan tek piksel fotodedektör örneklerin sıcaklığa bağlı olarak karanlık akım ölçümlerinin yapılabilmesi için Pfeiffer marka turbo moleküler pompa ve sıvı helyum soğutmalı CRYO DE-20452 kreostat kullanıldı. Kreostat içine konan örneklerin bacaklarına ilgili bağlantılar yapıldı, örnek yüzeyindeki sıcaklığı okuyacak olan sıcaklık sensörü yüzeye tam temas edecek şekilde vidalandı, aygıtın etrafını tamamen kapatacak ve sıcaklığa bağlı ışımaları engelleyecek şekilde silindirik şeklindeki ışımaya kalkanı geçirildi. Soğutulan yüzeyin nemlenmemesi amacıyla Pfeiffer turbo moleküler vakum pompası ile kreostat basıncı $\sim 10^{-5}$ Torr'a düşürülerek örnekler soğutuldu. Kreostatın

sıcaklık kontrolü Lakeshore 331 sıcaklık kontrolcüsü ile sağlandı. 40 – 310 K arasında 10’ar K aralıklarla Keithley 2635A akım – gerilim kaynak/ölçer cihaz ve LabVIEW tabanlı yazılım ile 10 mV aralıklarla sıcaklığa bağlı karanlık akım – gerilim ölçümleri yapıldı (ölçüm şeması şekil 3.5’te gösterilmektedir).

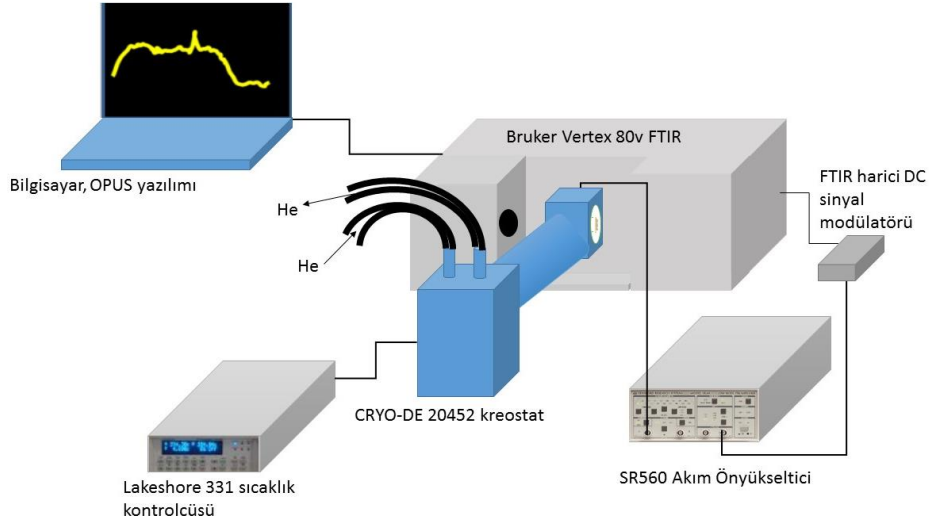


Şekil 3. 6: Sıcaklığa bağlı karanlık akım - gerilim ölçüm düzeneği

3.5.2 Sıcaklığa Bağlı Kızılötesi Spektral Fototepki Ölçümü

Daha önce paketlenmesi ve akım – gerilim ölçümü yapılmış olan tek piksel fotodedektör numunenin daha önce de belirtildiği gibi kızılötesi bölgede tepki vermesi beklenmektedir. Aygıtın çalıştığı ve kesime (cut-off) uğradığı dalga boylarını tespit edebilmek için FTIR ile görel bir spektral tepki ölçümü yapılması gereklidir (Şekil 3.6).

Tek piksel fotodedektör numunelerin Bruker Vertex 80v FTIR cihazında, yine aynı kreostat içinde gelen ışığın geçmesi için bir yüzü açık ışımaya kalkanı ile yakın (NIR), orta dalga (MWIR) ve uzun dalga (LWIR) kızılötesi bölgelerde, aygıtta herhangi bir gerilim uygulanmadan ve -60 mV gerilim uygulanarak 40 – 300 K arasında spektral tepki ölçümleri yapıldı. 40 – 100 K arasında 10 K, 100 – 300 K arasında ise 20 K aralıklarla ölçüm yapıldı. Kreostatın yüzeyine kızılötesi ışığı %80 seviyesinde geçiren ZnSe pencere takıldı. FTIR içerisinde ise NIR için CaF₂, MWIR ve LWIR için KBr demet bölücü kullanıldı. Yine sırasıyla NIR için TE-InGaAs, MWIR ve LWIR için DLaTGS dedektörler ile çevreden gelen arka plan (background) sinyali ölçülerek, detektöre düşen gerçek sinyalin görel şiddeti hesaplandı.

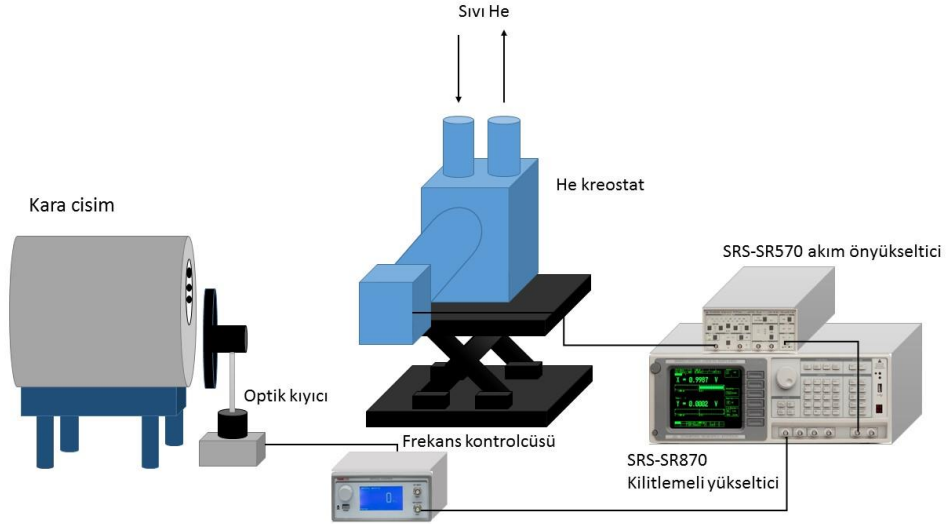


Şekil 3. 7: FTIR ile spektral tepki ölçümü deney düzeneği

3.5.3 Tepe Tepkisellik Ölçümleri

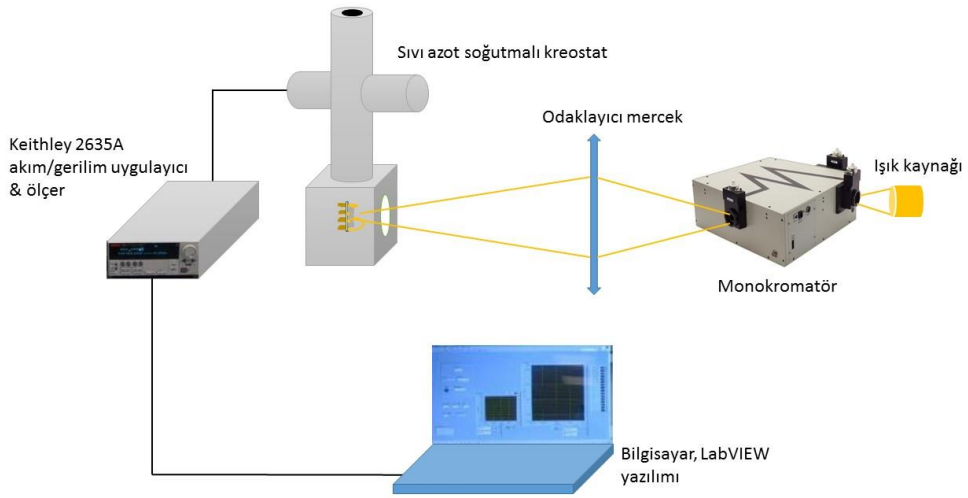
FTIR ile elektromanyetik spektrumun hangi bölgelerinde çalıştığının tespiti amacıyla yapılan spektral tepki ölçümü, göreceli bir ölçümdür, kalibre bir ölçüm bilgisini vermemektedir. Aygıtın sayısal değer olarak tepkiselliğinin ölçülmesi ise ısıtılan kara cisimde üretilen kızılötesi ışığın dedektörde yarattığı akım veya gerilimin okunması ile mümkündür. Bunun için bir kara cisim, ısıtılan kara cisimden gelen sinyalin arka plan sinyalinden ayrılması amacıyla optik kıyıcı (chopper), sinyali belirgin bir şekilde görebilmek için akım önyükseltici, bu sinyali okuyabilmek için ise salınan sinyali ortalama bir değer olarak bize Amper veya Volt cinsinden veren bir kilitlemeli yükseltici (lock-in amplifier) gerekmektedir.

Daha önce spektral tepki ölçümü yapılan numunelerin, kızılötesi tepkisellik ölçümleri için Newport Oriol® kara cisim, lock-in yükseltici, Stanford Research SRS80 önyükseltici kullanılarak MWIR ve LWIR için tepkisellik ölçümleri yapıldı. Kara cismin sıcaklığı 3 µm tepe dalga boyunu vermesi için 450 °C'ye kara cismin açıklığı ise pasivasyon öncesi ölçümlerde 0,2 inç, pasivasyon sonrası ölçümlerde ise 0,1 inç olarak ayarlandı. Örneğin içinde bulunduğu ZnSe pencere takılı kreostat kara cismin karşısına yerleştirildi. Örneğin kara cisimden toplam uzaklığı ise 19,75 cm olarak ölçüldü (şekil 3.6). Örnek yansımaları 3 µm için % 0,1 olarak daha önceki optik ölçümlerde belirlenmişti. Görünür ve yakın kızılötesi için ise monokromatör ile tepkisellik ölçümleri yapıldı.



Şekil 3. 8: Siyah cisim tepkisellik düzeneği

Ayrıca, görünür bölge için kalibre bir monokromatör mekanizması ile spektral tepki ve tepkisellik ölçümleri yapılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3. 9: VIS & NIR tepkisellik ölçüm düzeneği (monokromatör fotoğrafı <http://assets.newport.com/web600w-EN/images/37920.jpg> adresinden alınmıştır).

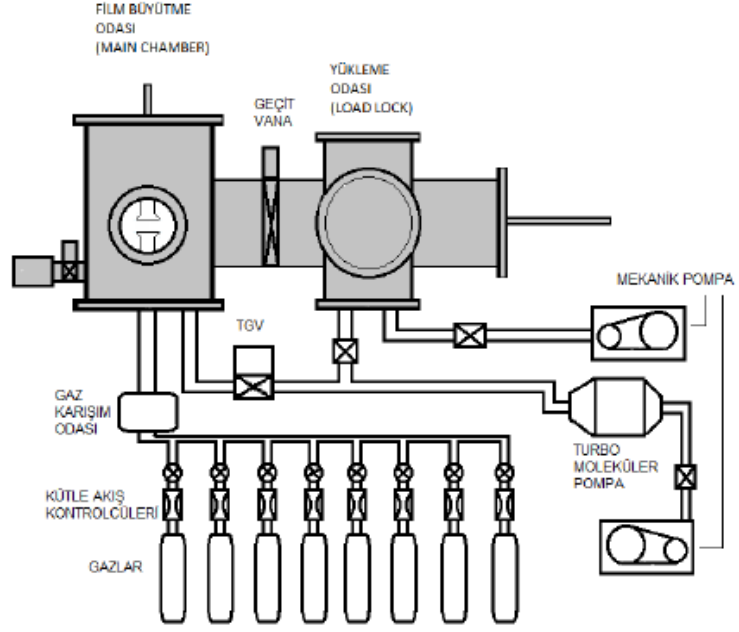
3.6 YÜZEY PASİVASYONU

Optoelektronik aygıtların yüzey kusurları yeniden birleşme merkezleri olarak davranırlar ve bu merkezler yüzeyden akan yük taşıyıcılarının ömür sürelerini bir hayli azaltırlar. Bu kusurlar, yüzey topografisindeki pürüzler, mikro/nano mertebedeki çatlaklar, çeşitli fabrikasyon hatalarına bağlı yüzey homojenizasyonunu bozan nedenler olabilir.

Ekseriyetle bu çalışmada istenen bir özellik olan yüzey pürüzlülüğü, yüzeydeki yeniden birleşme oranını arttırmaktadır. Lazerle işleme esnasında da meydana gelen ve tavlama işleminde az sayıda da olsa onarılmamış olarak kalan, fabrikasyon sırasında da meydana gelmiş olabilecek mikro/nano çatlaklar ile fabrikasyon sonrasında, mesa yapıların duvarları birer yeniden birleşme merkezi olarak davranırlar. Bu yeniden birleşme merkezlerinin yok olması için yarıiletken yüzey bir dielektrik malzeme ile kaplanır. Kızılötesi çalışmalarda genel olarak pasivasyon malzemesi olarak silisyum dioksit (SiO_2) veya silisyum nitrür (Si_3N_4) kullanılmaktadır [64]. SiO_2 ile pasivasyon yapılan örneklerin Si_3N_4 ile kıyaslandığında IR bölge için daha iyi bir pasivasyon malzemesidir, çünkü konu ile ilgili yapılan çalışmalar fototepki seviyesinin SiO_2 kaplı örneklerde daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

Silisyum aygıtlar için yapılan ince film kaplama işlemi için çokça kullanılan iki yöntem vardır. Bunlar atomik tabaka biriktirme (atomic layer deposition – ALD) [109], [110] ve kimyasal buhar biriktirme (chemical vapor deposition – CVD) [64] yöntemleridir. CVD yöntemleri arasından ise düşük basınçlı kimyasal buhar biriktirme (low pressure chemical vapor deposition – LPCVD [111]) veya plazma destekli kimyasal buhar biriktirme yöntemi (plasma enhanced chemical vapor deposition – PECVD (92)) yöntemleri pasivasyon için geçmişte kullanılmış yöntemlerdir. LPCVD, düşük basınç altında $800\text{ }^\circ\text{C}$ gibi yüksek sıcaklıklarda ince film kaplama yapmakta kullanılan bir yöntemdir. PECVD ise alternatif akım vakumlu ortamda plazma desteği ile daha düşük sıcaklıklarda ($200 - 400\text{ }^\circ\text{C}$) yüzeye kaplama yapabilen bir yöntemdir. Yüksek sıcaklıkların yüzeydeki katkı iyonlarını yüzeyden buharlaştırarak elde edilmesi hedeflenen aygıtta zarar verme riskinden dolayı PECVD daha tercih edilebilir bir pasivasyon yöntemidir. Bu çalışmada pasivasyon amacıyla PECVD yöntemi ile SiO_2 pasivasyonu yapılmıştır.

Daha önce paketlenmiş olan örnekler paketlerinden bu aşamaya girmesi için DIP paketin üzerinden söküldü ve Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, Amorf Yarıiletkenler Laboratuvarı'nda (AYİL) bulunan Vaksis PECVD ile yüzeylere SiO_2 pasivasyonu yapıldı ($13,56\text{ MHz}$ plazma frekansı, 200 mTorr , $200\text{ }^\circ\text{C}$, $1:4$ oranında $\text{SiH}_4:\text{CO}_2$ gaz oranı). Pasivasyon yapılan örnekler yeniden paketlenildi ve daha önce yapılan karanlık akım, IR ve VIS fototepki ölçümleri tekrarlandı.

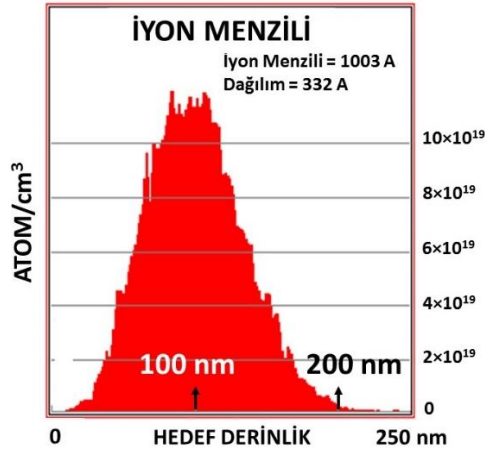


Şekil 3. 10: Pasivasyon yapılan PECVD sistemi [112].

4. VERİLER ve TARTIŞMA

4.1 İYON YERLEŞTİRME

Yarıiletken aygıtlar içinde p-n eklemlerini oluşturmak için kullanılan bu yöntemde silisyumun amorf olmasının sebebi, çok yüksek miktarda iyonun yüzeye yerleşebilmesi için çok yüksek bir potansiyel fark altında iyonların hızlandırılarak yüzeyin altına gömülecek şekilde silisyum alt taşa gönderilmesidir. Bunun için önceden bir miktar silisyum, yüzeyi amorflaştırarak için yüzeye gönderilerek yüzeyin birkaç yüz nanometre kadar amorflaşması sağlanmıştır. Daha sonra selenyum iyonları bu amorf yüzeyin altına yerleştirilmiştir. Bu iyonların toplamının 10^{20} atom.cm⁻³ mertebesinde olması, Mott limitinin üzerinde olması gerektiği içindir. Helmholtz Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) laboratuvarlarında kalibre bir şekilde hacim başına 10^{20} atom.cm⁻³ safsızlık atomun yüzeye yerleştirilmiştir. Şekil 4.1’de bu iyonların dağılımının SRIM/TRIM simülasyon programı ile kuramsal olarak profili çıkarılmıştır. İyonların en yoğun olduğu derinlik 0 – 200 nm arası olarak görünmektedir. Tepe noktası ise 100 nm civarındadır.

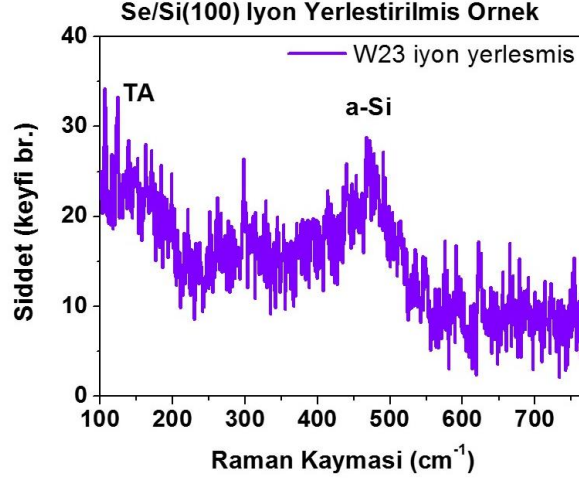


Şekil 4. 1: 150 keV enerji ile Si(100) yüzeyine gönderilen Se iyonlarının dağılım profili

4.2 ATIMLI LAZER OPERASYONU

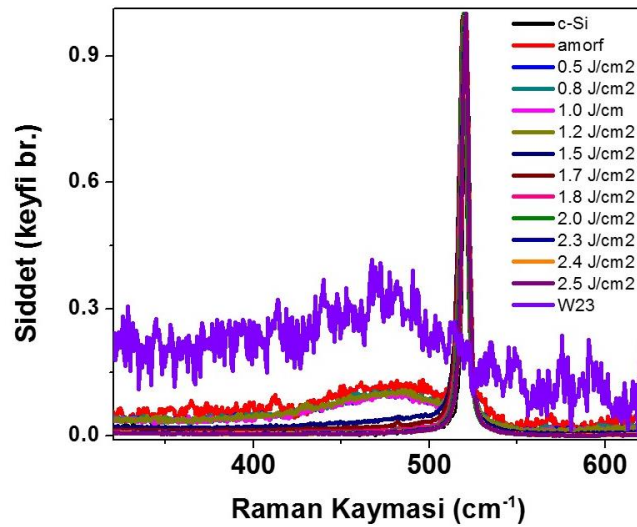
Nanosaniye lazer işlemi operasyonunun eritme ve pürüzleştirme olarak ikiye ayrılacağından bir önceki bölümde bahsedilmiştir. Nanosaniye atımlı lazer ile eritme yöntemi ile öncelikle farklı lazer atım enerji yoğunluklarında hızlı ve yerel eritilmiş ve amorf yüzey kristalize olmuştur. Sırasıyla 0,8, 1,0, 1,2, 1,5, 1,7, 1,8, 2,0, 2,3, 2,5 J/cm² enerji yoğunluklarındaki atımlardan 1,5 – 2,3 J/cm² enerji yoğunluklu olanın iyi bir

kristalizasyon sağladığı Raman saçılmasında görülmüştür. Aynı bölgeye 3 veya 4 kadar atım yapılan yeniden kristallendirmelerde en iyi kristal yapının olduğu literatürden alınmış ve uygulanmıştır [41], [68], [113]. Yapının yeniden kristallenmesi, silisyumdan gelen VIS ve özellikle selenyum iyonlarından gelen sinyalin mümkün olduğunca temiz gelebilmesi açısından önemlidir.



Şekil 4. 2: Selenyum iyon ekimi yapılmış silisyum örneğinin Raman spektroskopisinde yapısal analizi, 480 cm^{-1} Raman kaymasında yüzey amorf

Şekil 4.2'deki bu amorf yüzeyin en iyi şekilde kristallendirilmesi, oluşturulacak aygıttan alınacak en iyi sinyalin belirleyici özelliği olacaktır. Bu nedenle Si(100) Czochralski silisyum kristallerinin üzerine kaplanan amorf silisyum örnekler üzerinde yapılan lazer eritme ile kristalizasyon yapılarından alınan bilgi Şekil 4.3'te verilmiştir.



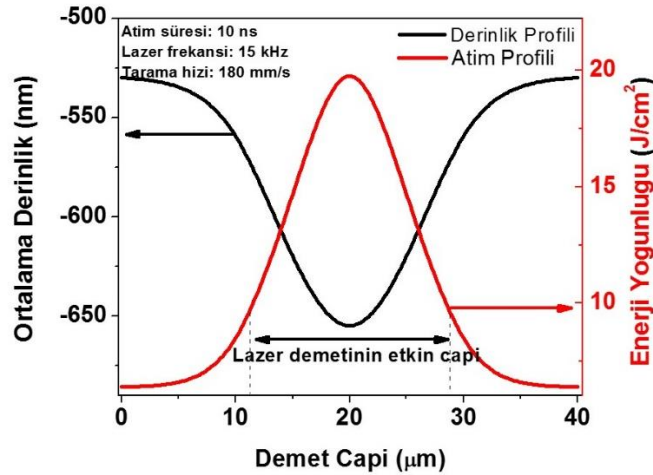
Şekil 4. 3: PECVD a-Si/c-Si(100) ve W23 örneklerinin hızlı erime ile kristalizasyon Raman kayması sonuçları

Şekilde iyon ekimi yapılmış W23 örneği, c-Si(100) üzerine PECVD’de kaplanmış a-Si örneklerin ve 1,5 J/cm² enerji yoğunluğunun altında lazerle eritme yapılmış örneklerin 480 cm⁻¹ değerinde tepeleri görülmektedir ki bu a-Si’nin karakteristik tepesidir [114]. 1,5 – 2,5 J/cm² enerji yoğunluğu ile taranmış yüzeylerde ise c-Si’ye ait 520,2±0,5 cm⁻¹ Raman kayması görülmektedir [115]. Ancak 2,3 J/cm² eşik değeri geçildiğinde ise yüzeyde bir takım tahribatların meydana geldiği bilinmektedir [68], [113]. Ayrıca yüzeyde kusurlar meydana geldiği görülmektedir.

Nanosaniye lazerin yüzeydeki 2,3 J/cm²’nin üzerinde olacak şekilde çalışıldığı zaman yüzeyde artık yalnızca erime olmamakta, pürüzleşme de görülmektedir. Burada yüzeyin ısıtılmasının yanı sıra, eş fazlı ışığın meydana getirdiği mekanik bir tahribat mekanizması da görülmektedir. Enerji yoğunluğunun yüzeye olan aktarımı

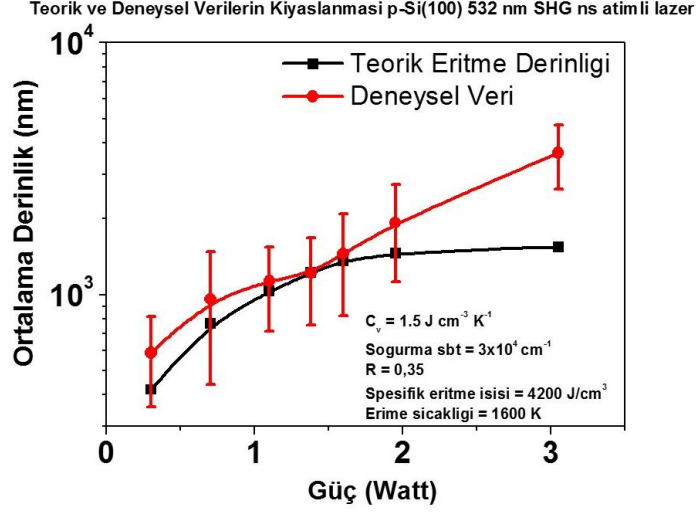
$$F(r) = \frac{2Ek}{\pi} \left[\int_0^{a/w_0} \rho \exp(-\rho^2) J_0(kr\rho) d\rho \right]^2 \quad (4.1)$$

Ampirik enerji yoğunluğu ifadesiyle verilir [116]. Burada k, karakteristik ters uzaklıktır, $k = 2\pi w_0 / (f\lambda)$ olarak tanımlanmıştır ve λ dalga boyu, F enerji yoğunluğu, r , $1/e^2$ şiddetinde demetin yarıçapı, a arka odak düzlemindeki kesim açıklığı, J_0 birinci derece Bessel fonksiyonu, f odak uzaklığıdır [116]. Bessel fonksiyonu burada aslında Gaussyen demetin şeklini vermektedir. Bu denklem çözüldüğü zaman bir Gaussyen enerji yoğunluğu ifadesi ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.4: 532 nm dalgaboyunda çalışan Q-anahtarlı Nd:YAG atımlı lazerin enerji yoğunluğu eşitliğine göre şekli ve ortalama derinliği

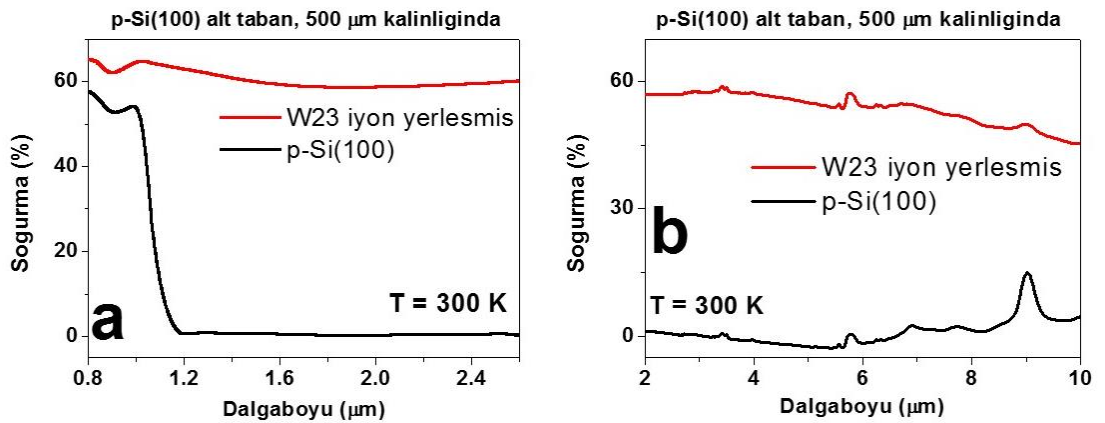
Yüzey tahribatı ise $2,3 \text{ J/cm}^2$ (Nd:YAG nanosaniye ikinci harmonik yeşil lazer için $0,7 \text{ W}$) sonrasında başlamaktadır. $2,3 \text{ J/cm}^2$ sonrasında yüzeyin dokulandırılma grafiği ise Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5: Rofin Powerline E20 SHG PV Nanosaniye Derinlik ve güç kalibrasyonu ile (4.1) eşitliğinin kıyaslanması

4.3 OPTİK ÖLÇÜMLER

Selenyum iyonlarının gömülü olduğu W23 örneğinin FTIR'da $0,7 - 10 \mu\text{m}$ arasında spektral olarak geçirgenlik ve yansımaya testleri sonucunda elde edilen soğurma Şekil 4.7'deki gibidir.

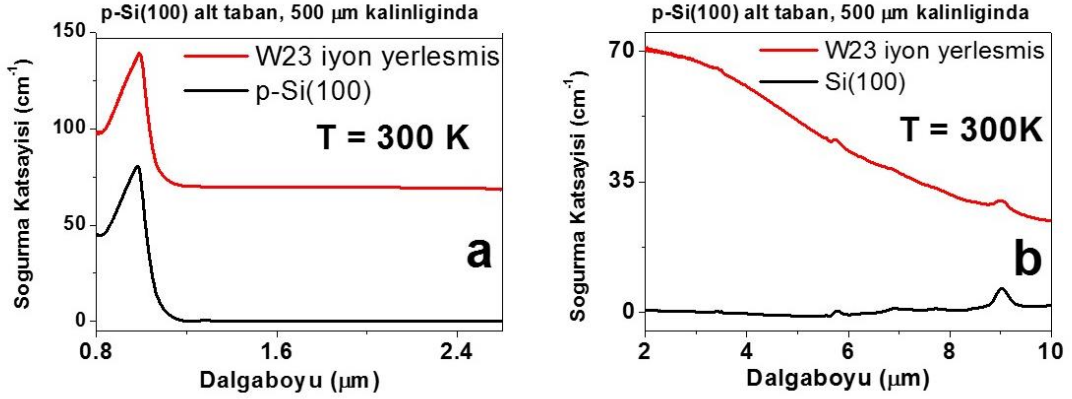


Şekil 4.6: Se iyonlarının yerleştirildiği lazerle işlenmemiş W23 örneğinin (a) NIR, (b) MWIR ve LWIR bantları için soğurma yüzdeleri

Tüm bu soğurma değerlerinden

$$\alpha = \frac{1}{d} \cdot \ln\left(\frac{1-R}{T}\right) \quad (4.2)$$

eşitliğine göre soğurma katsayıları (Şekil 4.8) [113] elde edilmiştir.

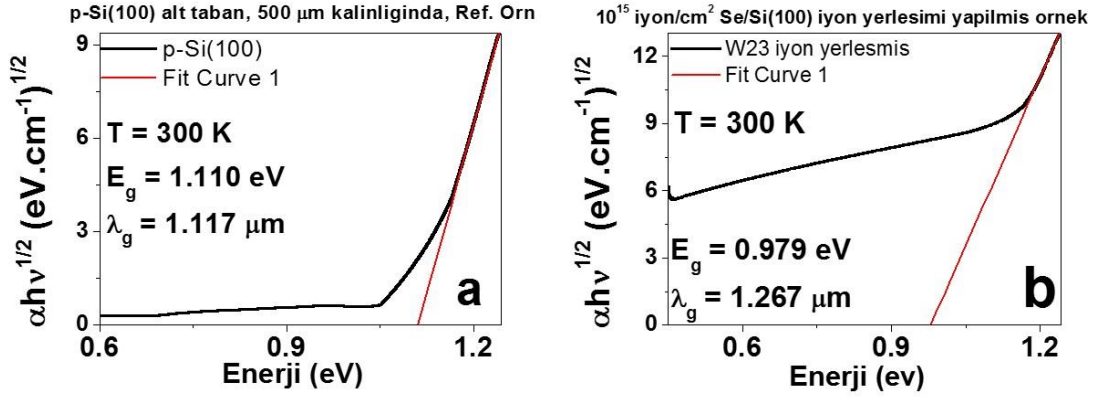


Şekil 4.7: İyon yerleştirmesi yapılmış örneklerin, (a) NIR, (b) MWIR ve LWIR bantları için soğurma katsayıları (karşılaştırmalı)

Şekil 4.7'deki soğurma katsayılarından yola çıkılarak bant aralığını matematiksel olarak hesaplamak amacıyla

$$\alpha h\nu = \beta(h\nu - E_g)^n \quad (4.3)$$

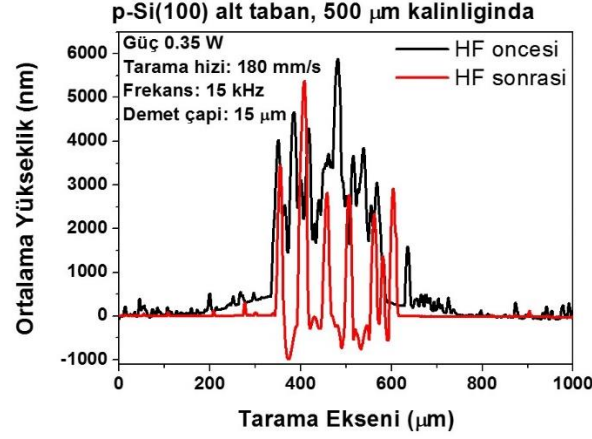
Tauc eşitliğine göre bir Tauc çizimi yapılır. Burada α soğurma katsayısı, h Planck sabiti, ν ölçülen spektrumun enerjisi, E_g malzemenin yasak bant aralığı, β geçiş olasılığına bağlı bir katsayı, n ise bant yapısının durumuna göre değişen bir kuvvettir ve dolaylı bant aralığında $n = 2$, doğrudan bant aralığında ise $n = 1/2$ olarak alınır [117]. Tauc çizimi ile yalnızca iyon ekimi yapılmış örneklerin bant yasak enerji seviyeleri belirlenmiştir (Şekil 4.9). Şekil 4.9'da y-ekseninin $\alpha h\nu^{1/2}$ seçilmesinin nedeni, silisyumun dolaylı bant aralığına sahip olmasıdır [117], [118]. Yapılan Tauc çizimlerinde doğrusal fitin x-eksenini kestiği yer, bant aralığıdır [117].



Şekil 4.8: Soğurma katsayısından Tauc plot ile (a) referans p-Si(100), (b) Se/Si(100) (yalnız iyon yerleştirme yapılmış) bant aralığı elde edilmesi

Şekil 4.8'e göre elde edilen sonuçlarda, yerleştirilen iyonlar Si(100) bant yapısında bir azalmaya yol açmıştır. Yüzeğe ekilen Se iyonları, yüzeğe absorptansı, soğurma katsayısını arttırmıştır.

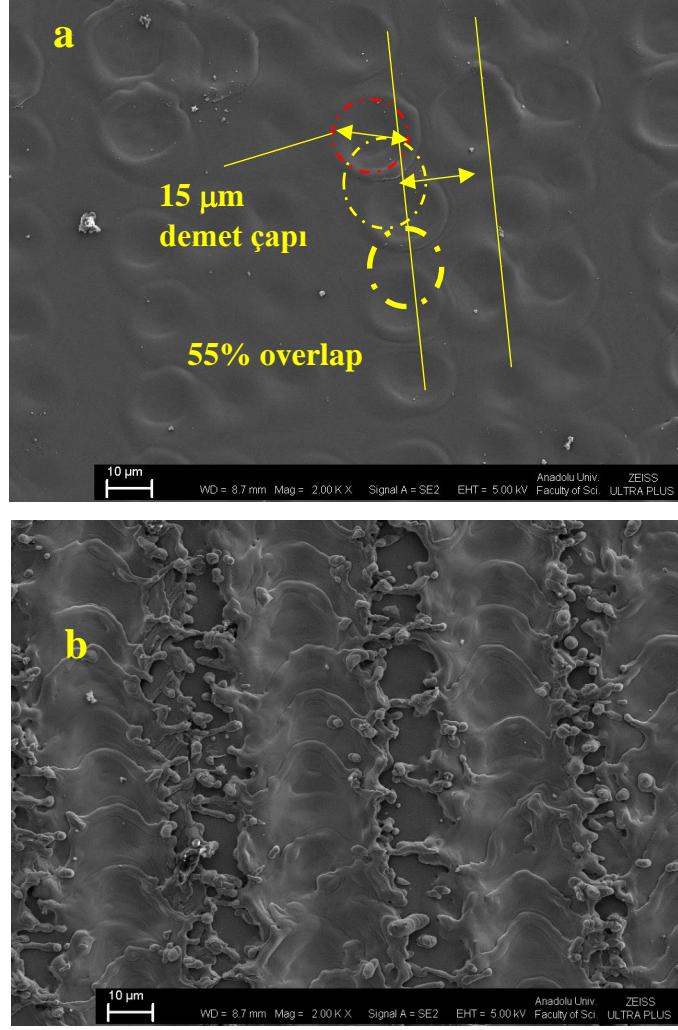
Atmosferik yüzeğe silisyum yüzeği eritecek miktarda güç uygulandığında, silisyum, yalnızca yerleştirilen iyonlarla değil, atmosferdeki başka elementlerle de tepkimeye girmektedir. Silisyumun en kolay bağ kurduğu elementlerden biri de oksijendir. Silisyumun, atmosfer ortamında oda sıcaklığında dahi belli bir süre durduğunda yüzeğinde silisyum dioksit, silisyum nitrür veya silisyum oksit nitrür gibi bileşikler oluşmaktadır [119]. Oluşan silisyum dioksit (SiO_2) ve silisyum nitrür (SiN_x), hidroflorik asit (HF) tarafından çok hızlı aşındırılmaktadır [120]. Bu yüzden verimliliği azaltmaması için HF içinde, SiO_2 ve SiN_x kaldırılması silisyum üzerine yapılan çalışmalarda standart bir işlemdir. Yüzeğe lazerle dokulandırıldıktan sonra işlenen bölge Veeco Dektak 6M yüzeğe profilometresi ile taranmış, tarandıktan sonra oluşan SiO_2 'nin yüzeğden kaldırılması amacıyla %10'luk HF çözeltisi hazırlanarak [121] 1 saat süreyle çözelti içinde bekletilmiştir. Asit çözeltisinden çıkarılan silisyum örnek tekrar profilometreye konulmuş, asit öncesi ve sonrası fark üst üste konularak incelenmiştir. Sonuçlarda silisyum yüzeğinin dokulandırılma sürecinde bir miktar oksitlenme olduğu da gözlenmiştir ve eritilen yüzeğın gerçek derinliği ölçülmüştür (Şekil 4.9).



Şekil 4.9: Atımlı lazer ile dokulandırılan yüzeyin ortalama derinlik ölçüm sonucu (0,35 W güç, 180 mm/s tarama hızı, 15 kHz frekans ve 15 μm) demet çapı).

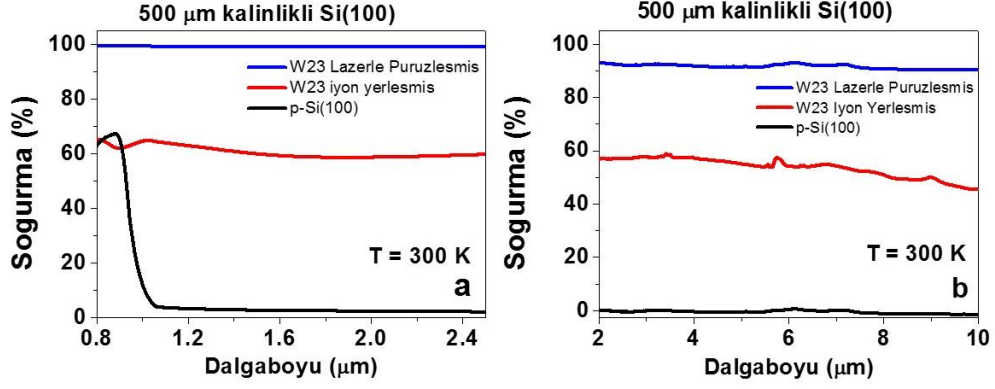
Deneyin bir diğer aşaması vakum altında yapılmasıdır. Atmosferik ortamda yapılan lazerle işleme deneylerinin yanısıra vakum odasında turbo moleküler pompa ile vakumlanarak 3×10^{-5} mbar mertebesinde vakum altında ve argon atmosfer altında, daha önce atmosferik ortamda yapılan yüzey işlemlerinin bazıları tekrarlanmıştır. Deneyler hem vakumda, hem de argon gazı altında tekrarlanmıştır, ancak deney sonuçları tezde yer almamaktadır.

Atmosferik ortamda yapılan bir takım örneklerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi bünyesindeki Zeiss Ultra Plus FESEM taramalı elektron mikroskobu ile ölçümleri alınmıştır (Şekil 4.10). Burada lazer demetinin yarıçapının 15 μm olduğu görülmüştür.



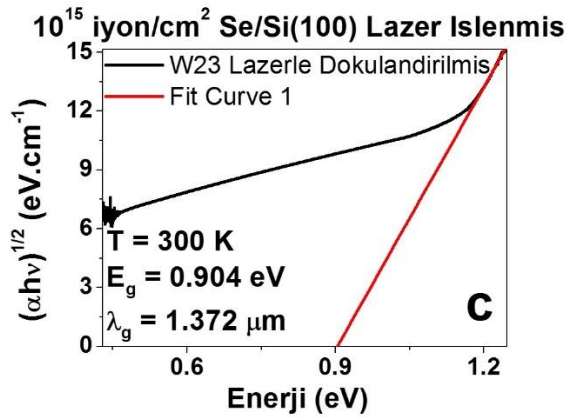
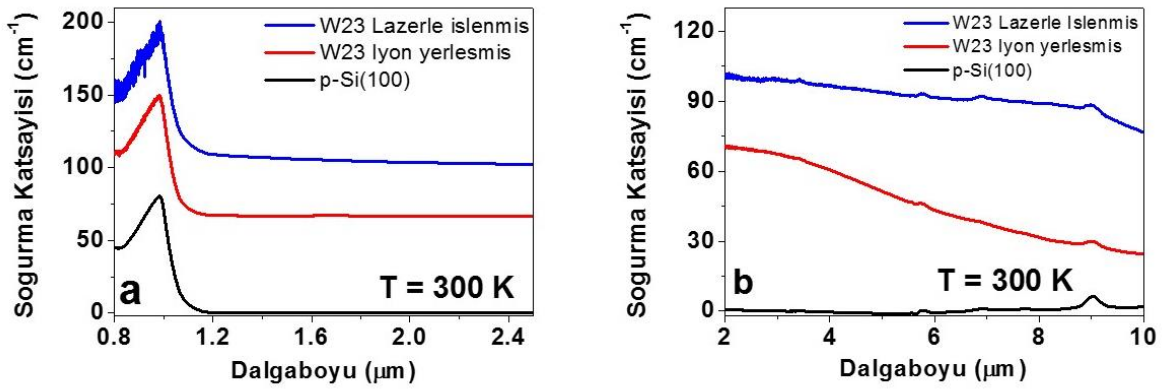
Şekil 4. 10: (a) $2,3 \text{ J/cm}^2$ (b) 21 J/cm^2 enerji ile taranmış yüzeyin SEM görüntüsü. 15 µm demet çapı

Bu pürüzlü yüzeylerle ilgili optik ölçümler, iyon ekimi yapılan ve test için pürüzleştirilen örneklerle karşılaştırmalı olarak geçirgenlik ve yansıtması ölçülmüş, bu bilgiler ışığında soğurması hesaplanmıştır (Şekil 4.11).



Şekil 4. 11: Atımlı lazerle oluşturulan pürüzlü yüzeylerin (a) NIR, (b) MWIR ve LWIR bantlarında soğurma absorptansları

Lazer ile taranan W23 numunesinin oda sıcaklığında soğurması, NIR spektrum için karşılaştırmalı olarak soğurma katsayısı ve Tauc grafiğinden bize bir alt bant soğurma bilgisini verecektir (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8).

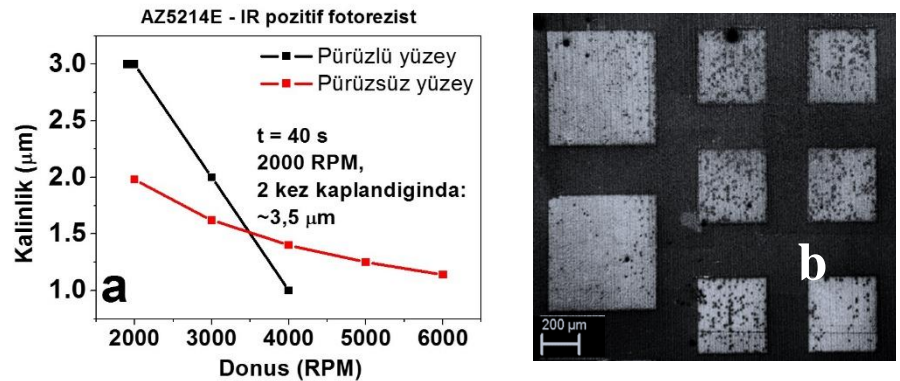


Şekil 4.12: (a) NIR, (b) MWIR ve LWIR bantları için lazerle dokulandırılmış ve işlenmemiş W23 soğurma katsayısı (karşılaştırmalı) (c) NIR için Tauc çiziminden bant aralığı tayini

Ayrıca MWIR, LWIR bantları (1,5 – 10 μm) için karşılaştırmalı soğurma katsayısı Şekil 4.12-b'dedir. Buna göre NIR soğurma katsayısı lazerle işlenmiş örnekte 200 cm^{-1} , yalnız iyon yerleştirilmiş örnekte 150 cm^{-1} olarak hesaplanmıştır. MWIR ve LWIR bantları için soğurma katsayısı lazerle taranmış 100 cm^{-1} ve 80 cm^{-1} arasında değişmekte, iyon yerleştirilmiş örnekte ise 70 cm^{-1} 'den 30 cm^{-1} 'e doğru azaldığı gözlemlenmektedir ki kristal silisyumun NIR bölgedeki soğurma katsayısı 70 cm^{-1} civarında, MWIR ve LWIR bölgedeki soğurma katsayısı ise sıfırdır (Şekil 4.7 ve 4.8). Bu bantlar için anlamlı bir Tauc çizimi yapılamamıştır. Tepkiselliğe sahip dalga boyları için FTIR spektral tepkileri incelenmiştir (Şekil 4.12).

4.4 MİKROFABRİKASYON

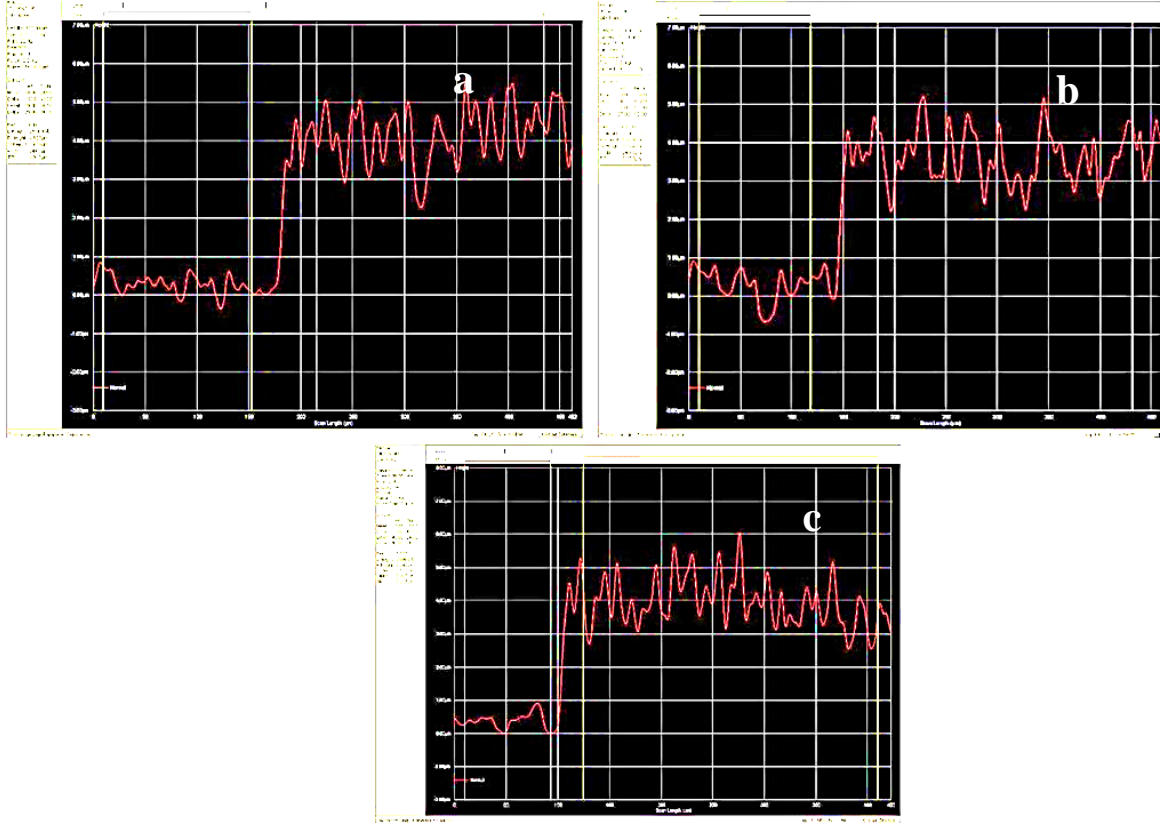
Test için rastgele seçilen W23 örnek yüzeyi seçili parametrelerle lazerle taranarak ve pürüzleştirilmiştir. Pürüzleştirilen örnek öncelikle 400°C 'de 1 saat tavlanaarak lazerle işleme esnasında oluşabilecek tahribatların giderilmesi sağlandı. Tavlama sonrasında tek piksel fotodedektörün oluşturulması amacıyla önce ODTÜ GÜNAM laboratuvarlarında sert maske için pürüzsüz yüzeye göre 380°C sıcaklıkta ortalama 150 nm silisyum nitrür (Si_3N_4) kaplama yapıldı, sonrasında Anadolu Üniversitesi Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda AZ5214E-IR fotorezisti ile fotolitografi yapıldı. Fotolitografi için kullanılan AZ5214E-IR fotorezistinin, lazerle pürüzleştirilmiş yüzey için ayrıca bir kalibrasyonu yapıldı.



Şekil 4.13: AZ5214E-IR fotorezistin (a) pürüzlü yüzeye göre kalibrasyon grafiği (b) fotolitografi işleminden sonra SEM görüntüsü

Islak kimyasal aşındırma yoluyla ağırlıkça %40, %50 ve %60, 90°C sıcaklıkta, manyetik karıştırıcı ile cam kapta hazırlanan KOH çözeltisinde 30 saniye mikrofabrikasyona

sokulan ve mesa deseni elde edilen pürüzlü örneğin aşındırma profilleri Şekil 4.14'te verilmiştir.



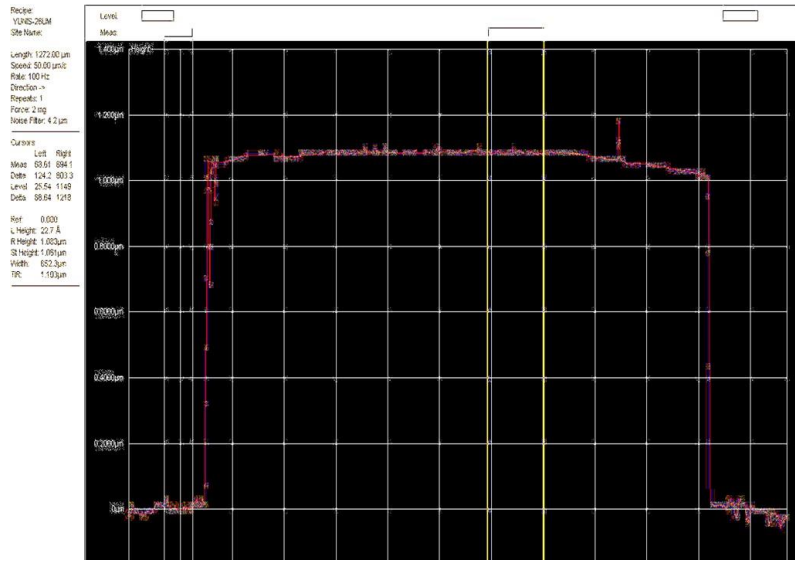
Şekil 4. 14: KOH ile mikrofabrikasyon için ağırlıkça (a) %40, (b) %50, (c) %60 derişimde, 90 °C sıcaklıkta, 30 saniye aşındırma sonunda yüzey profilometresi (belirleyici) görüntüleri

Aşındırma işlemlerinde alt tabanın mümkün olduğunca düz ve yüzey kusurlarının azalmış olması, telin bağlanmasının sağlamlığı ve direncin azalması açısından tercih sebebidir. Yüzeydeki kusurlu ve pürüzlü yapıyı homojen bir şekilde aşındırabilmesi için KOH çözeltisinin mümkün olduğunca agresif olması gerekliliğini doğurmuştur. KOH çözeltisi, mümkün olduğunca derişik ve sıcaklığı fazla olduğunda istenilen pürüzlülüğü yok edebilmektedir. Derişimin üst limiti %60 olarak belirlenmiştir. Bu orandan daha yüksek derişime sahip KOH çözeltilerinin mikrofabrikasyonda herhangi bir fazladan etkisi gözlenmemektedir [105], [106]. Benzer şekilde, KOH çözeltisinin yüksek sıcaklıkta olması istenmekte, ancak süreci zorlaştırmaması açısından kaynamaması istenmektedir. Böylece mevcut reçete ile istenen mesa basamağı elde edilebilmiştir.

Yüzeyden ortalama olarak (ortalama olarak tarif edilmektedir çünkü yüzey pürüzlülüğü söz konusudur) 4 µm derinlikte elde edilen basamaklar, metal kontak işlemi için

uygundur. Daha az derinlikte istenen taban ve mesa – taban farkı elde edilememekte, böylece metal kontak işlemi için tam bir basamak şeklinde uygun yüzey elde edilememektedir. Benzer şekilde daha derin bir aşındırma yapılacak olursa da, aygıtın elektron hol çiftleri daha uzun bir yol kat etmek zorunda kalacaklarından elde edilen sinyal şiddeti (tepkiselliği) beklenenden az olacaktır. Bu nedenle optimum derinliğin 4 µm civarında olduğu saptanmıştır.

Yüzey pürüzleştirme yapılmadan yalnızca eritme yapılarak hazırlanan W23-5 örneğine yine aynı kalınlıkta Si₃N₄ kaplanmış, standart aşındırma reçetesi olan kütlece %50, 90 °C sıcaklıkta KOH çözeltisinde aynı yöntemle mikrofabrikasyon yapılmıştır. Yüzeyden içeriye ise 1,1 µm aşındırma yapıldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4. 15: W23-5 örneğinin yüzey belirleyici görüntüsü

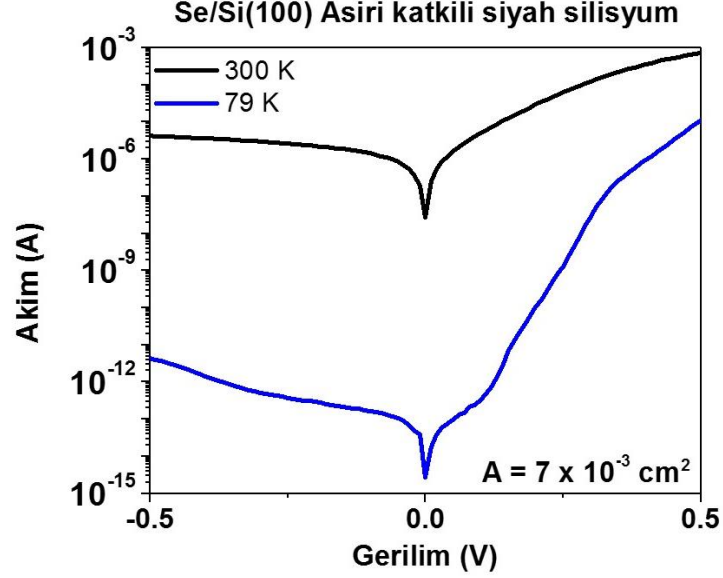
4.5 ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLER

Yarıiletken aygıtların davranışları sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir ve dedektörlerin çalışmasında en önemli parametrelerden biri sıcaklıktır. Sıcaklığa bağlı olarak, dedektörün elektriksel iletkenliği, verdiği tepki, karanlık akım gibi parametrelerinin ölçümlerine ait analizler verilmiştir.

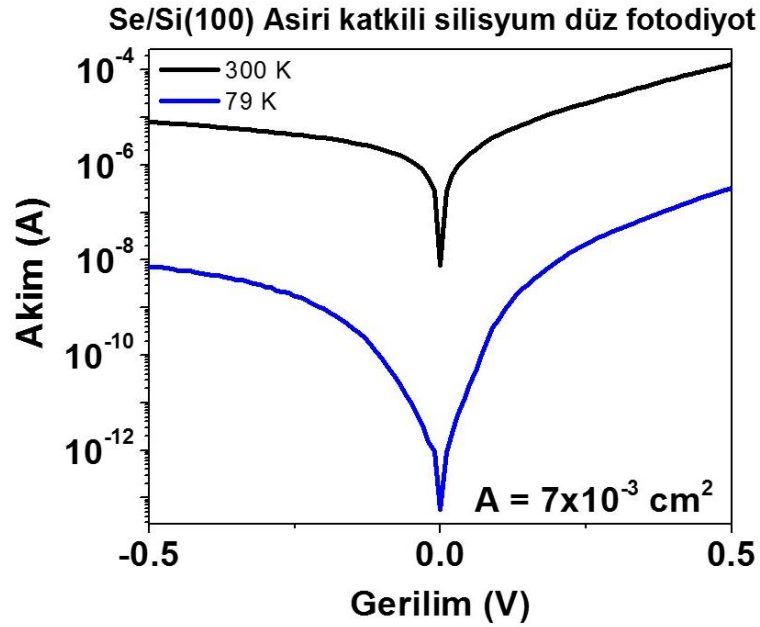
4.5.1 Karanlık Akım – Gerilim Ölçümleri

Dedektörün karanlık akım – gerilim ölçümlerinin yapılması için kreostatla 10 K aralıklarla yapılan ölçümler sonucunda şekil 4.16 ve 4.17’deki akım – gerilim değerleri

elde edilmiştir. Tüm ölçümler detaylı olarak ek bölümünde gösterilmiş olup, şekil 4.16 ve 4.17’de yalnızca sıvı azot kaynama sıcaklığı civarında bir sıcaklık olan 79 K ve oda sıcaklığına tekabül eden 300 K sıcaklıkta karanlık akımı, gerilime karşılık ölçülmüştür.



Şekil 4. 16: Se/Si(100) aşırı katkılı siyah silisyum karanlık akım – gerilim ölçümleri



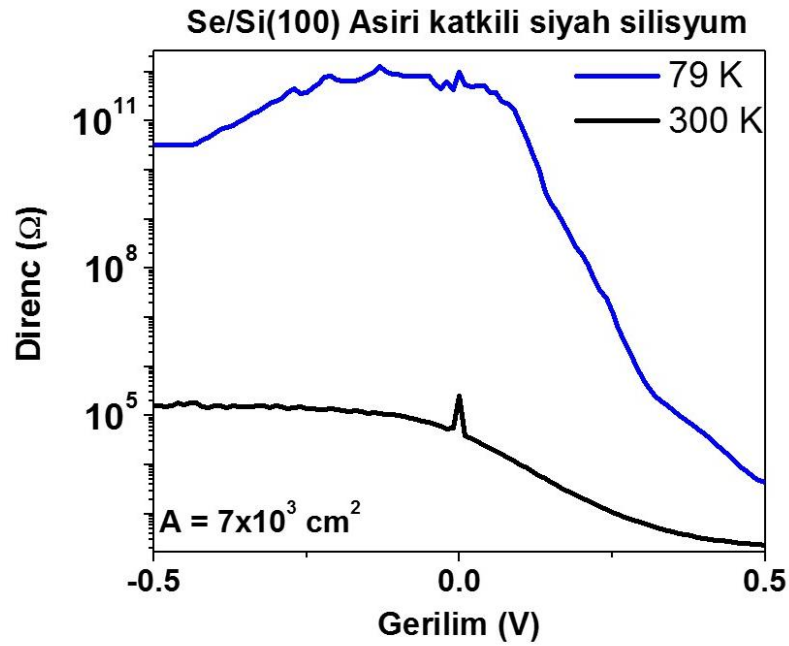
Şekil 4. 17: Se/Si(100) aşırı katkılı yalnızca eritme yapılan numune akım – gerilim ölçümleri

Sıcaklığa bağlı akım ve gerilim ölçümlerinde 79 K için 0 V akım değeri $2,76 \times 10^{-15}$ A mertebesinde. Akım yoğunluğu olarak ise sıvı azot sıcaklığı civarlarında bu değer 39,4

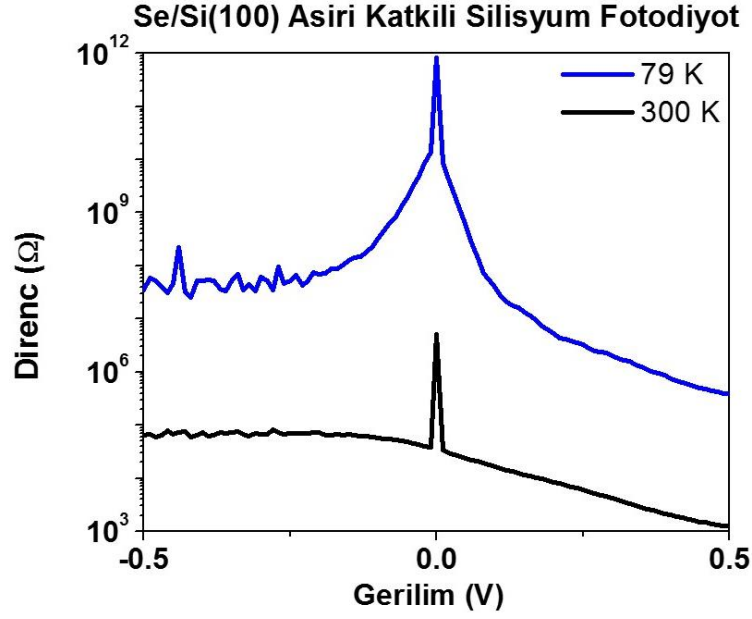
$\times 10^{-12}$ A/cm², oda sıcaklığına çıkıldığında ise $3,80 \times 10^{-6}$ A/cm² mertebesinde bir akım yoğunluğu elde edilmiştir. Yalnızca eritme yapılarak hazırlanan pürüzsüz örnekte ise 79 K için 0 V karanlık akım değeri $5,65 \times 10^{-14}$ A olarak ölçülmüştür (Şekil 4.16) . Akım yoğunluğu ise $8,07 \times 10^{-12}$ A/cm² olarak hesaplanmıştır. 300 K sıcaklıkta ise kaçak akım W23-5 numunesinde $7,70 \times 10^{-9}$ A, akım yoğunluğu ise $1,1 \times 10^{-6}$ A/cm² 'dir (Şekil 4.17). Bu karanlık akım değeri, kızılötesi görüntüleme aygıtları arasında yaygın olarak kullanılan QWIP veya süperörgü dedektör tiplerine göre oldukça düşük bir karanlık akım değeridir [64], [122]–[125]. Ayrıca bu ölçümlerde çok önemli bir durum da, ölçüm yapılan pikselden elde edilen doğrultma çok belirgin ve keskindir. Bu durum, aygıtın bir diyot özelliğine sahip olduğu yönündedir. Bu karanlık akım ölçümünden

$$R = \left(\frac{dI}{dV} \right)^{-1} \quad (4.4)$$

Eşitliğine bağlı olarak numunelerden bir karanlık direnç elde edilmiştir ve şekil 4.18 ve 4.19'da belirtilmiştir.



Şekil 4. 18: Se/Si(100) aşırı katkıli siyah silisyum fotodiyotların karanlık direnç değerleri



Şekil 4. 19: Se/Si(100) aşırı katkılı pürüzsüz silisyum diyotların karanlık direnci
Karanlık akım – gerilim ölçümlerinden elde edilen direnç – gerilim ölçüm sonuçlarına dair veriler Çizelge 2’de verilmiştir.

	Pürüzlü	Pürüzlü	Düz yüzey	Düz yüzey
	Akım (A)	Direnç (Ω)	Akım (A)	Direnç (Ω)
79 K, 0V	$2,76 \times 10^{-15}$	$9,70 \times 10^{11}$	$56,5 \times 10^{-15}$	$8,33 \times 10^{11}$
79 K, -60 mV	$1,18 \times 10^{-13}$	$8,04 \times 10^{11}$	$1,56 \times 10^{-11}$	$1,31 \times 10^9$
300 K, 0 V	$2,66 \times 10^{-8}$	$2,51 \times 10^5$	$7,70 \times 10^{-9}$	$5,00 \times 10^6$
300 K, -60 mV	$9,8 \times 10^{-7}$	$7,88 \times 10^4$	$1,42 \times 10^6$	$5,01 \times 10^5$

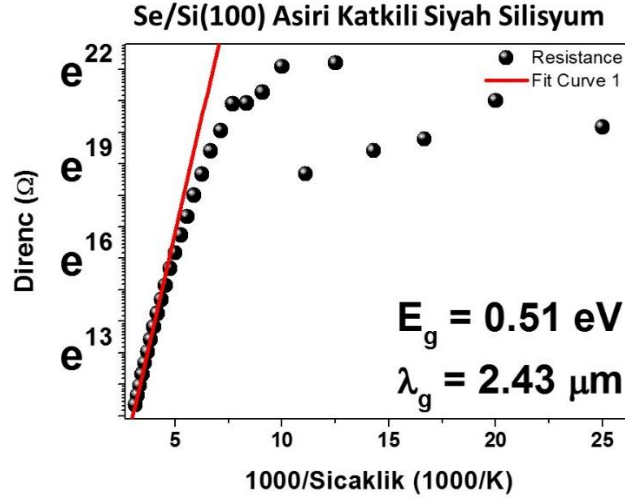
Çizelge 2. 300 K ve 79 K için farklı gerilimler altında akım gerilim değerlerinin dağılımı

79 K için 0 volt gerilimde 970,1 GΩ, -60 mV gerilimde ise 803,6 GΩ direnç elde edilmiştir (Şekil 3.17). 300 K sıcaklıkta ise 0 Volt için 250,9 kΩ, -60 mV için ise 788,0 kΩ karanlık direnç elde edilmiştir. Yalnızca eritme yapılan W23-5 örneği için Bu denli düşük karanlık akım ve direnç, aygıtın diferansiyel rezistans R_{0A} değerini de arttıracak, bu sebeple anlamlı bir dedektivite sağlayacaktır. Bu dirençlerin sıcaklığın tersine göre bir

grafığı çizildiğinde ve buradan bir doğrusal çizim yapıldığında yapı içindeki akım yoğunluğunun hesabı yapılabilir.

$$R = A. \exp\left(-\frac{E_A}{2k_B T}\right) \quad (4.5)$$

Bu hesaba göre sıcaklığın tersine göre direnç çizildiğinde (Şekil 4.20)



Şekil 4. 20: Dirençten aktivasyon enerjisi elde edimi için Arrhenius çizimleri

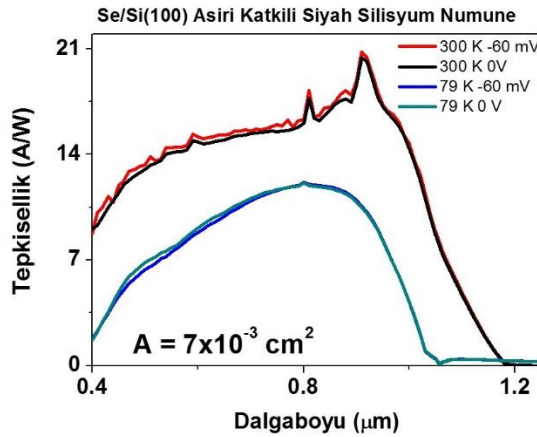
Oda sıcaklığına yakın bölgelerden bir doğrusal fit yapıldığında (Şekil 4.20) oda sıcaklığındaki aktivasyon enerjisi elde edilir. Fit edilen doğru eğiminden aktivasyon enerjisi hesaplanır, bu da bant aralığına eşittir. Bu sıcaklıkta difüzyon akımı baskındır. Bu aktivasyon enerjisi 0,51 eV, aktivasyon dalgaboyu ise 2,43 μm olarak hesaplanmıştır (4.4). Silisyumun çalışma aralığının 1,1 μm olduğu düşünüldüğünde oldukça uzun bir dalgaboyunda algılama yapabilmemesi beklenmektedir. Ancak spektral tepki analizlerinde kesilim dalgaboyununun 1,2 μm olduğu görülmüştür (Şekil 4.21). Bunun sebebi olarak daha uzun dalgaboylarında ekstrinsik enerji seviyelerinin bir şekilde ışığa yapmayan yeniden birleşme (NRR) merkezi olarak davrandığı düşünülebilir [126].

4.5.2 Spektral Tepki, Tepe Tepkiselliği, Kuantum Verim ve Dedektivite

Bölümler 3.5.2 ve 3.5.3'te belirtilen yapılan spektral tepki ölçümleri, görünür (VIS) yakın kızılötesi (NIR) ve orta kızılötesi (MWIR) ve uzak kızılötesi (LWIR) bantları için 0,4 – 10 μm arasında yapılmıştır. Elde edilen Amperé (A) cinsinden fotoakımın, Watt (W) cinsinden okunan referans dedektör gücüne bölünmesi ile görünür ve IR bölgedeki tepe tepkisellik sinyali elde edilir (A/W). Bu bölümde yapılan ölçümler, her spektrum için

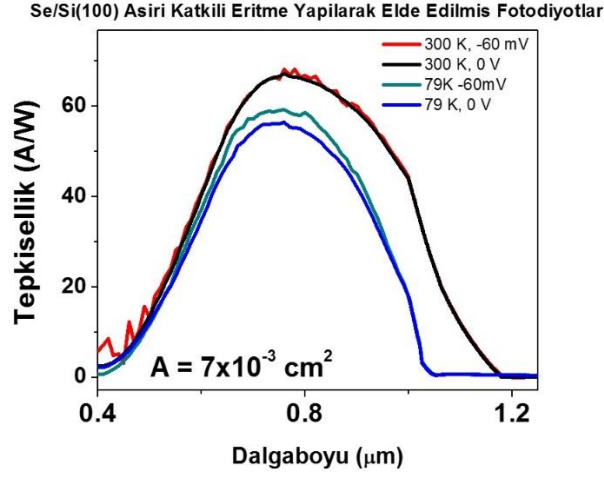
pürüzlü siyah silisyum yüzey ve sadece eritme yapılarak rekristalize edilmiş pürüzlü olmayan yüzey için ayrı ayrı verilmiştir.

Yüzeyi pürüzleştirilerek elde edilmiş aşırı katkılı siyah silisyum örnekler için tepe tepkisellikleri 79 K ve 300 K için Şekil 4.21’de verilmiştir. Tepe tepkisellikleri 0 V için 20,4 A/W, -60 mV gerilim altında 20,8 A/W olarak ölçülmüştür. %100 kesilim dalgaboyu ise 300 K için 1,2 μm , 79 K için ise 1,05 μm olarak gözlemlenmiştir. Bu durumda, sıcaklıkla beraber oda sıcaklığına doğru kesilim dalgaboyunun da, tepkiselliğin de artmakta olduğunu söylemek mümkündür. Burada p-i-n fotodiyotlar gibi p ve n kutupları arasında esas bir taşıyıcı yoktur. Azınlık yük taşıyıcılarının kinetik enerjisinin artması sonucunda banttan banda optik bant geçişlerinde de kolaylaşmalar sağlanmaktadır. Ancak bununla beraber termal gürültüde de artış olmaktadır ve sinyalin gürültüsü de artmaktadır. Bu durum bu şekilde yorumlanabilir.



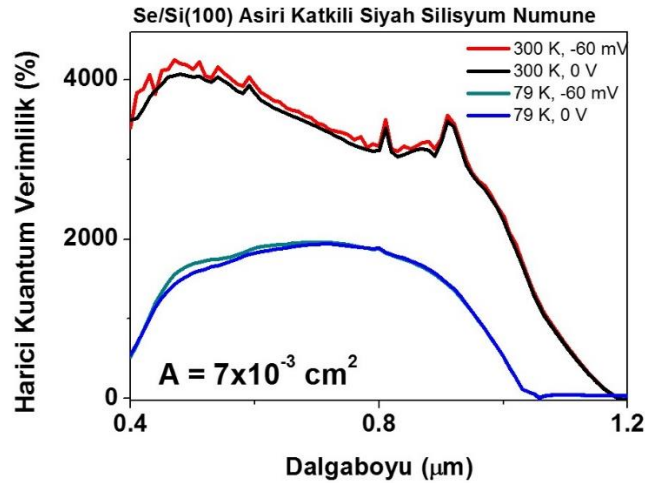
Şekil 4. 21: 79 K ve 300 K için, 0 (Sıfır) V ve -60 mV’de VIS & NIR için dalgabaoyuna bağlı tepkisellik grafikleri

Yalnız eritme yapılmış yüzeylerde elde edilen tepe tepkisellik grafikleri ise Şekil 4.22’de verilmiştir. Sadece yüzeyi eritilerek, herhangi bir pürüzleştirmeye maruz bırakılmadan hazırlanan yüzeylerden elde edilen fotodiyotların tepkiselliği ise 300 K sıcaklıkta -60 mV gerilim altında 68,2 A/W, 0 V gerilim altında ise 67,3 A/W olarak elde edilmiştir. 79 K sıcaklıkta ise tepe tepkisellik değerleri -60 mV için 59,2, 0 V için 56,4 A/W olarak ölçülmüştür. Siyah siyah silisyum ve pürüzleştirilmemiş silisyum aygıtlar için kesilim dalgaboyları ise aynıdır.

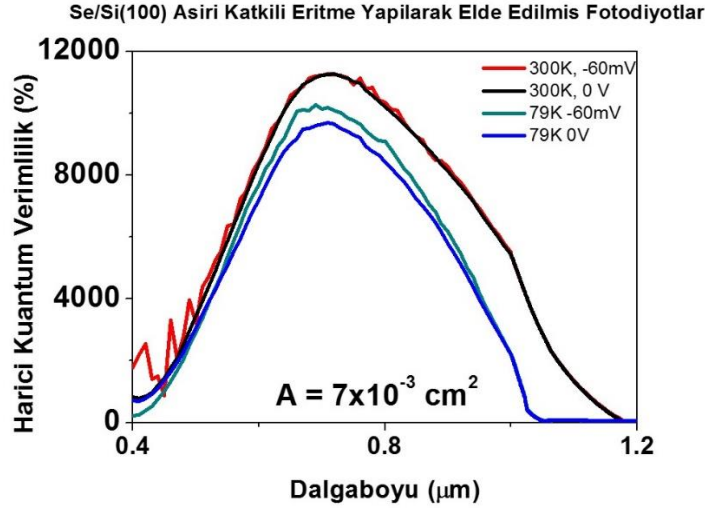


Şekil 4. 22: Yalnız eritme yaparak elde edilmiş fotodiyotların 79 K ve 300 K sıcaklıkta VIS & NIR için dalgaboyuna bağlı tepkisellikleri

Harici kuantum verimler Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te %100'ün üzerinde görülmektedir. Bunun nedeni üçüncü bölümde tartışılmış olan çoklu eksiton oluşumdur ve daha önce literatürde yapılan başka çalışmalarda da bu tarz verilere rastlanmıştır [127]. Harici kuantum verimlilikler siyah silisyum fotodiyotlar için %2000 – 4000 arasında değişirken (Şekil 4.23), düz yüzeyle fotodiyotlarda %11000'lere kadar çıkabilmektedir (Şekil 4.24). Burada verimle ilgili çok büyük bir kazanç söz konusudur. Bu denli yüksek verimli fotodiyotların varlığına literatürde de rastlanmıştır [127].



Şekil 4. 23: VIS & NIR için 0 V ve -60 mV için harici kuantum verimlilik grafikleri



Şekil 4. 24: Yalnız eritme yaparak elde edilmiş fotodiyotların 79 K ve 300 K sıcaklıkta VIS & NIR için harici kuantum verimlilik grafikleri

Spesifik dedektivite (D^*), bir dedektörün kalitesinin belirlenmesi için esas parametrelerden biridir. Bu parametre, tepe tepkiselliği, karanlık direnç, karanlık akım ve sıcaklık parametrelerine bağlı olarak sıfır gerilim altında

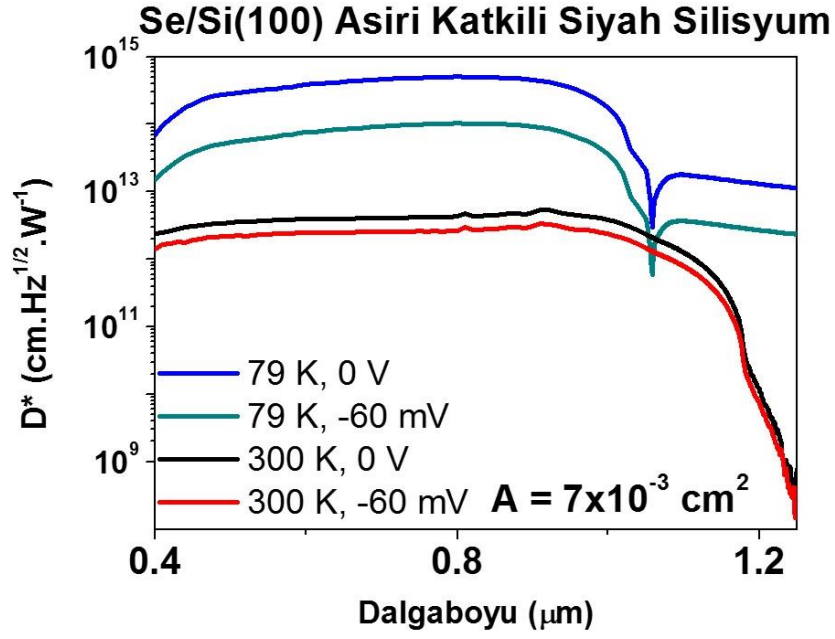
$$D^* = \mathcal{R} \cdot \sqrt{\frac{R_0 A_d}{4k_B T}} \quad (4.6)$$

eşitliği ile verilir. Bias altında ise dedektivite,

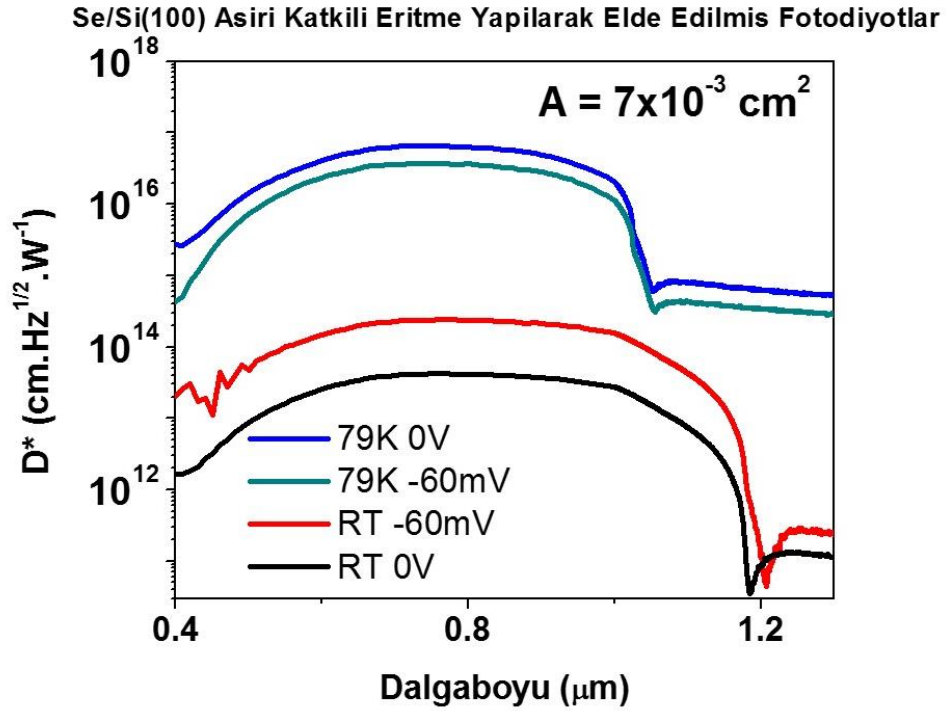
$$D^* = \mathcal{R} \cdot \sqrt{\frac{A_d}{2qI}} \quad (4.7)$$

Eşitliği ile hesaplanır. 4.5 ve 4.6 eşitliklerinde \mathcal{R} tepe tepkiselliği, R_0 karanlık akımdan elde edilen direnç, I karanlık akım, q birim yük, A_d dedektör alanı, T mutlak sıcaklık, k_B ise Boltzmann sabitidir.

Se/Si(100) siyah silisyum aygıtın dedektivite değeri ise şekil 4.23'te verilmiştir. Dedektivite değerleri $\text{cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ (Jones) cinsinden verilirler. 300 K için dedektivite mertebeleri 0 V'de $3,33 \times 10^{12} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ ve -60 mV gerilimde $5,45 \times 10^{12} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ değerlerinde iken 79 K için -60 mV'de $1,01 \times 10^{14}$, 0 V için ise $5,00 \times 10^{14} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ değerindedir. Yalnız eritme yapılmış Se/Si(100) aşırı katkılı fotodiyotlar için ise bu değerler 79 K sıcaklıkta 0 V için $6,5 \times 10^{16} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$, -60 mV gerilimde ise $3,67 \times 10^{16} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Yine aynı fotodiyotlar için 300 K sıcaklık D^* değerleri 0 V için $4,24 \times 10^{14} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$, -60 V için $2,39 \times 10^{14} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ olarak belirlenmiştir ve Şekiller 4.25 ve 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4. 25: 79 K ve 300 K sıcaklıklarda 0 V ve -60 mV gerilim altında D* değerleri



Şekil 4. 26: Yalnızca eritme yapılmış aşırı katkılı Se/Si(100) fotodiyotlar için 79 K ve 300 K için VIS & NIR dedektivitesi

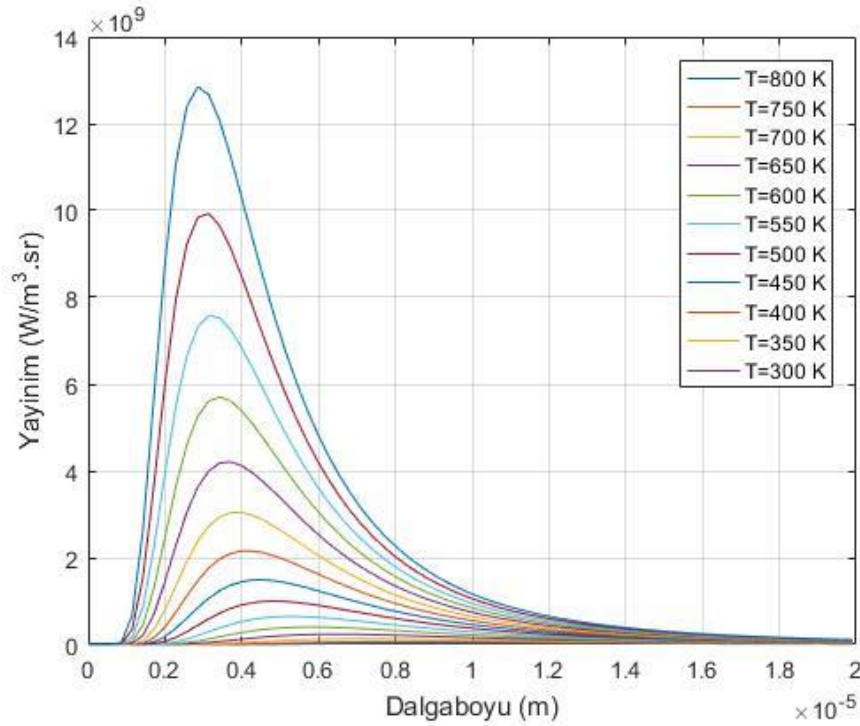
Tepkiselliğin oda sıcaklığında yüksek olmasına karşın, karanlık akım değerleri sıvı azot sıcaklığında çok daha düşüktür. Bu da 79 K sıcaklıkta, oda sıcaklığına nazaran daha iyi bir D* sağlamaktadır.

Aygıtın hangi spektrumda tepkiselliğe sahip olduğunun anlaşılabilmesi için aygıttan alınan sinyalin o spektrumda tepki veren bir diğer dedektörün sinyaline bölmek gerekir. Silisyum aygıttan alınan sinyal DLaTGS sinyaline bölündüğünde 0 ve -60 mV gerilimlerde elde edilen spektral tepki şekil 4.25'te verilmiştir.

Ticari silisyum fotodiyotlar bu bölgede herhangi bir tepki vermemekte, ancak Se iyonlarıyla katkılanarak pürüzleştirilmiş örnek MWIR ve LWIR bantlarda 9,5 μm dalgaboyuna kadar gelen kızılötesi ışınları algılayabilmektedir. Bu da arada harici enerji seviyelerinin bir bant hâlinde yoğun bir şekilde bulunduğunu ve silisyum aygıtlarda daha önce literatürde görülmemiş bir sinyal algılama şeklini ortaya koymaktadır.

Siyah cisim, soğurduğu ışın kadar ışın yayabilen bir cismi ifade etmektedir.

Planck yasasına göre siyah cisimden yayılan ışının enerjisi Şekil 4.27'deki gibidir.



Şekil 4. 27: Planck Dağılımı

$$M_{\lambda} = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 [e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1]} \quad (\text{W} / \mu\text{m}.\text{m}^2) \quad (4.8)$$

ile verilir. Burada h Planck sabiti, c ışık hızı, k Boltzmann sabiti, λ dalgaboyu, T siyah cismin sıcaklığıdır.

Şekilde görüldüğü üzere, siyah cismin sıcaklığı arttıkça, en yüksek yayınım enerjisi daha kısa dalgaboylarında gerçekleşmektedir (Şekil 4.27). Bu durum ise Wien yer değiştirme yasası (4.9) ile açıklanır.

$$\lambda_{tepe} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} m \cdot K \quad (4.9)$$

İdeal bir siyah cisimden yayılan toplam enerji ise siyah cismin sıcaklığının dördüncü kuvveti ile değişir (4.10).

$$M = \sigma \cdot T^4 \text{ (W/cm}^2\text{)} \quad (4.10)$$

σ burada Stefan – Boltzmann sabitidir ve $5,6705 \times 10^{-12} \frac{W}{cm^2 \cdot K^4}$ değerindedir.

A/W cinsinden tepkisellik için 2.6.3 bölümünde verilen deney düzeneğinde alınan ölçümlere göre tepe tepkiselliği karacisim ile 0,2 inç açıklık, 19,75 cm kara cisimden örnek yüzeyi mesafesi, 20 nA/V önyükseltici hassasiyeti, %0,1 örnek yüzeyinin yansıma oranıdır. A/W cinsinden kalibre tepkisellik, 4.7 eşitliğine (Planck eşitliği) göre hesaplanmıştır. Bu eşitlikten tepe tepkisellik hesabı yapabilmek için bir dönüşüm çarpanı kullanılmaktadır. Bu eşitlikler ve ilgili dönüşüm çarpanı 4.11, 4.12 ve 4.13 eşitliklerinde verilmiştir.

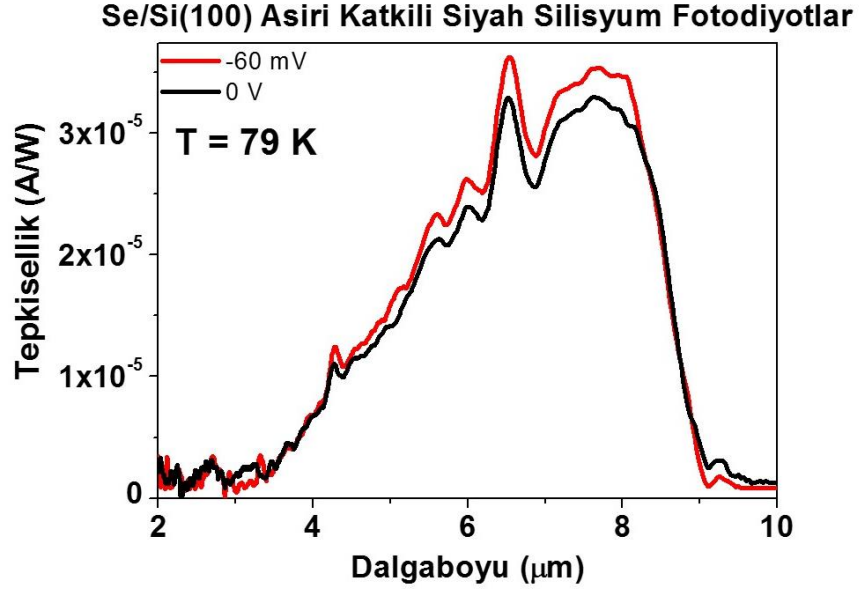
$$R_{BB} = \frac{V_{ör} \cdot \text{hassasiyet}}{\frac{D_{BB}^2 \cdot A_d}{4r^2} \cdot \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda)_{BB} d\lambda \right) \cdot T_p \cdot M_F} \quad (4.11)$$

$$C = \frac{\sigma \cdot T_{BB}^4}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda)_{T_{BB}} \cdot S(\lambda) d\lambda} \quad (4.12)$$

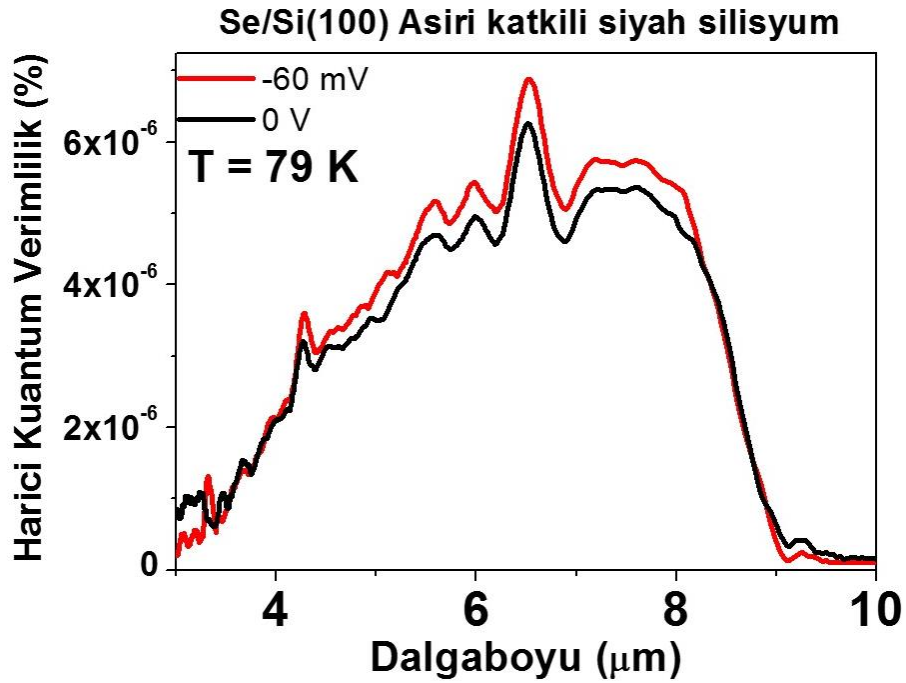
$$R = C \cdot R_{BB} \quad (4.13)$$

R parametresi tepe tepkiselliğini, R_{BB} , siyah cisim tepkiselliğini, $M(\lambda)_{T_{BB}}$ siyah cismin hangi sıcaklıkta çalışıyorsa o sıcaklıktaki siyah cisim tayfını, C dönüşüm faktörünü, σ Stefan-Boltzmann sabitini, $S(\lambda)$ FTIR'dan elde edilen sinyalin normalize formunu, $V_{ör}$ örneğin tepe tepkisellik ölçümünde gözlenmiş olan gerilim değerini, *hassasiyet* önyükseltici hassasiyetini (nA/V veya μ A/V cinsinden), D_{BB} siyah cisim açıklığını, A_d pikselin optik olarak aktif alanını, T_p kreostat penceresinin geçirgenlik oranını, M_F optik kıyıcının modülasyon çarpanını temsil etmektedir.

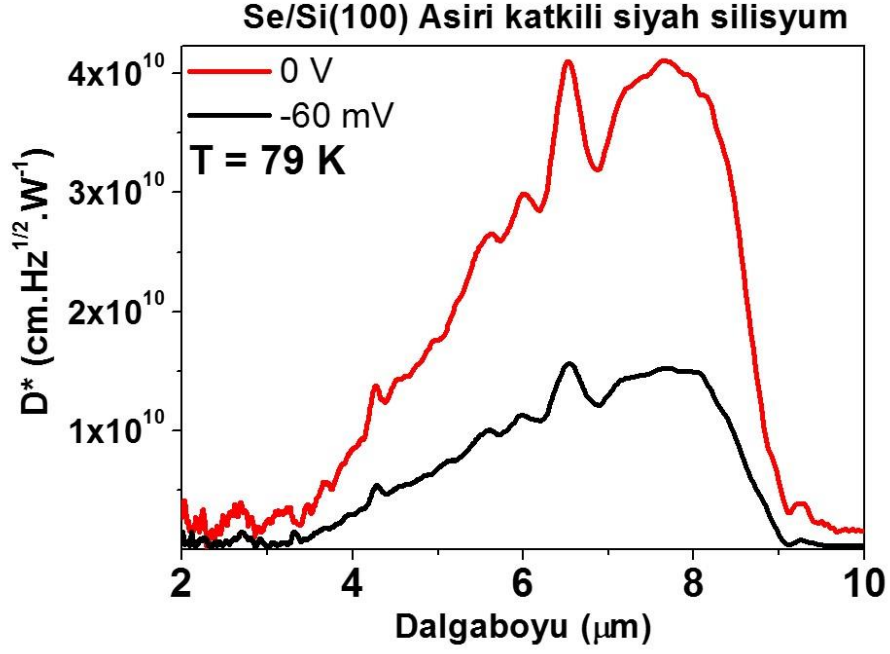
Eldeki veriler, bu eşitliklerle birleştirildiği zaman tepe tepkisellik ve harici kuantum verim grafikleri, Şekil 4.28 ve 4.29'daki gibi elde edilmiştir. D^* grafiği ise 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4. 28: 79 K sıcaklıkta 0 V ve -60 mV dalgaboyuna bağlı tepkisellikleri



Şekil 4. 29: Se/Si(100) örneğinin MWIR & LWIR bantları için harici kuantum verimlilik grafikleri

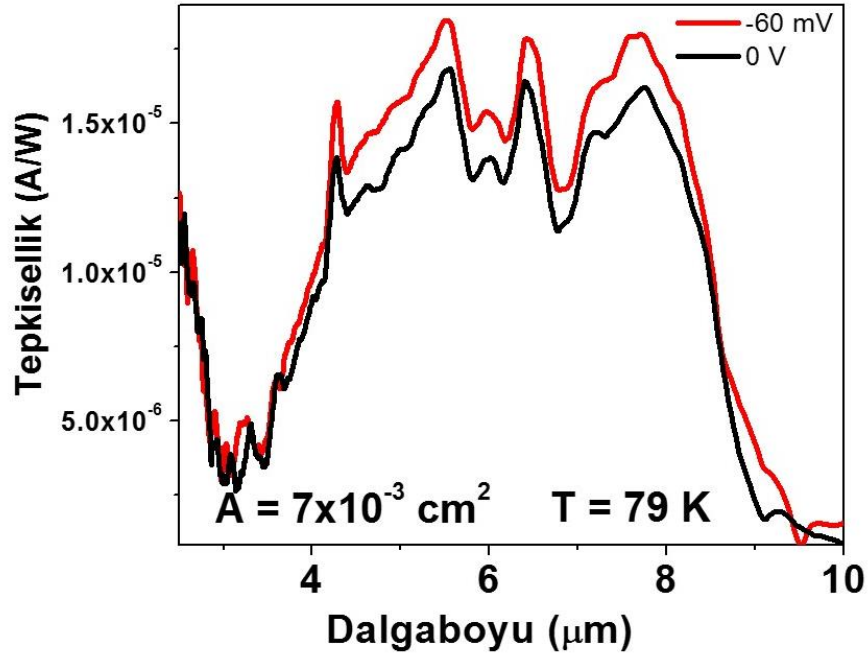


Şekil 4. 30: 0 V ve -60 mV için D* karşılaştırması

Dedektivite hesapları sonucunda, 0 V için dedektivite $4,11 \times 10^{10} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ elde edilmiştir. -60 mV gerilim altında ise, dedektivite, $1,52 \times 10^{10} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ elde edilmiştir. Bu değer, birinci bölümde verilmiş olan bir takım konvansiyonel dedektörlerin D* değerleriyle eşdeğer bir D* değeridir ve oldukça geniş bir spektrumdadır.

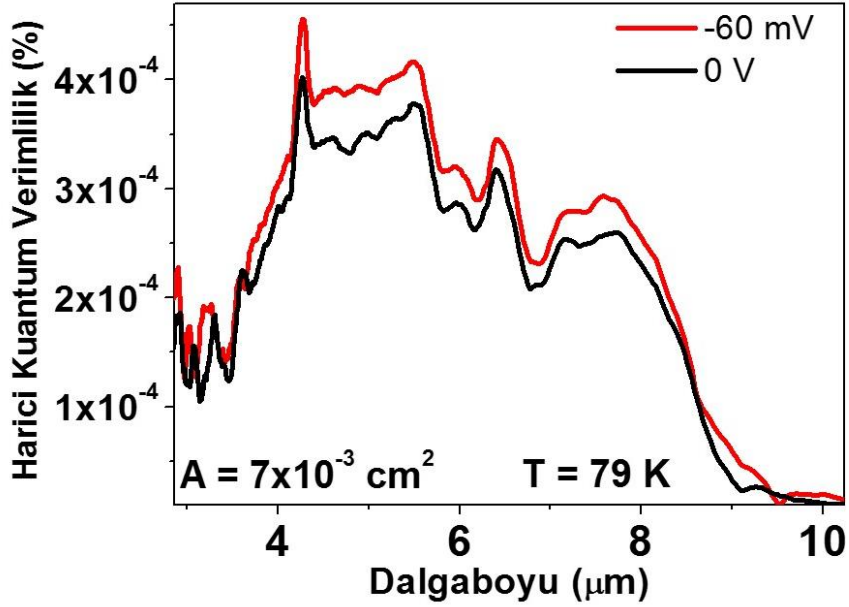
Yüzeyde pürüzleştirme yapmadan yalnızca eritme yapılarak hazırlanan W23-5 örneğinin ise MWIR-LWIR bantları için tepkisellik, kuantum verimlilik ve dedektivite sonuçları Şekil 4.31, 4.32 ve 4.33'te verilmiştir.

Se/Si(100) Sadece Eritme Yapılarak Elde Edilen Fotodiyotlar

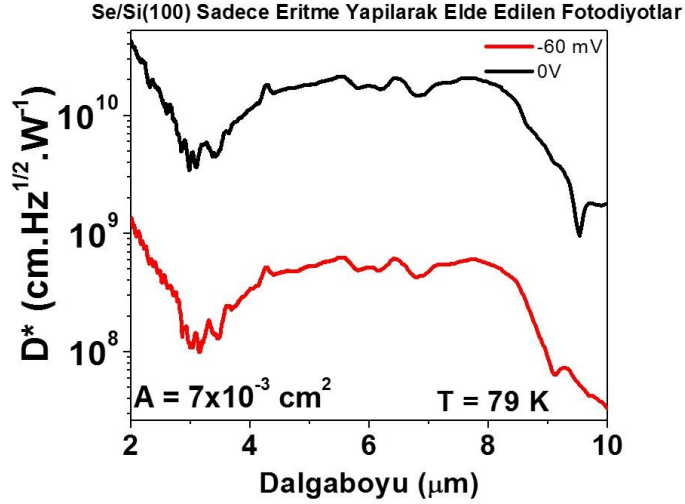


Şekil 4. 31: Yalnız eritme yapılan Se/Si(100) fotodiyotlarının 79 K sıcaklıkta dalgaboyuna bağlı tepkisellikleri

Se/Si(100) Sadece Eritme Yapılarak Elde Edilen Fotodiyotlar



Şekil 4. 32: Yalnız eritme yapılan Se/Si(100) fotodiyotlarının harici kuantum verimleri (%)

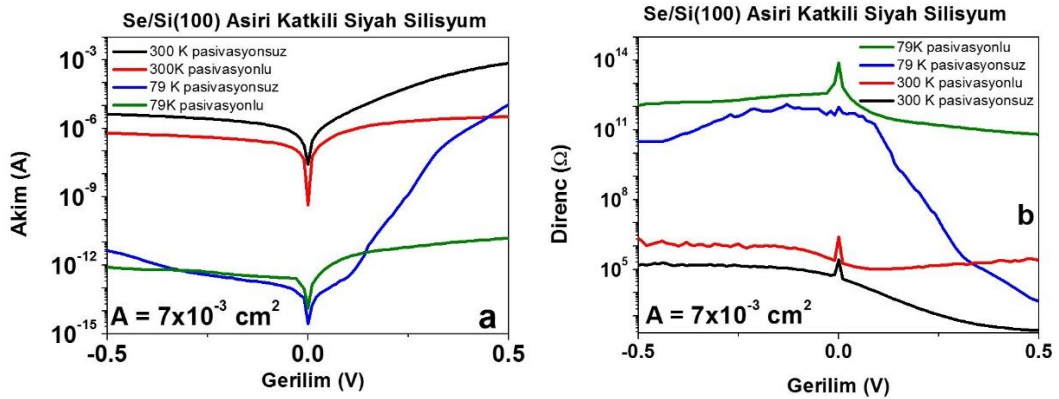


Şekil 4. 33: Yalnız eritme yapılan Se/Si(100) fotodiyotlarının dedektivitesi

Yalnızca eritme yapılarak hazırlanan fotodiyotların tepkisellikleri de siyah silisyum örneklerin tepkiselliği mertebesinde. Belirgin bir değişim gözlenmemiştir.

4.6 YÜZEY PASİVASYONU

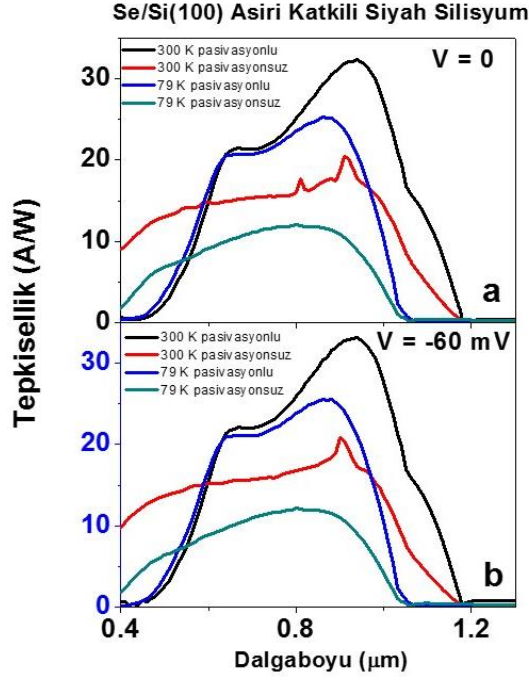
Yüze 300 nm SiO₂ pasivasyonu yapıldıktan sonra ise pasivasyon öncesinde yapılan tüm elektriksel ölçümler tekrarlanmıştır. Akım – gerilim ölçümleri pasivasyonsuz akım – gerilim ölçümleri ile pasivasyonlu ve pasivasyonsuz direnç – gerilim hesaplamaları kıyaslamalı olarak Şekil 4.32’de verilmiştir. Pasivasyonlu örneklerin karanlık akım değerlerinde gözle görülür bir azalma vardır. Özellikle 300 K için karanlık akım yaklaşık yüz kat azalmaktadır.



Şekil 4. 34: Pasivasyonlu ve pasivasyonsuz (a) akım gerilim ölçümleri, (b) direnç – gerilim ölçümleri

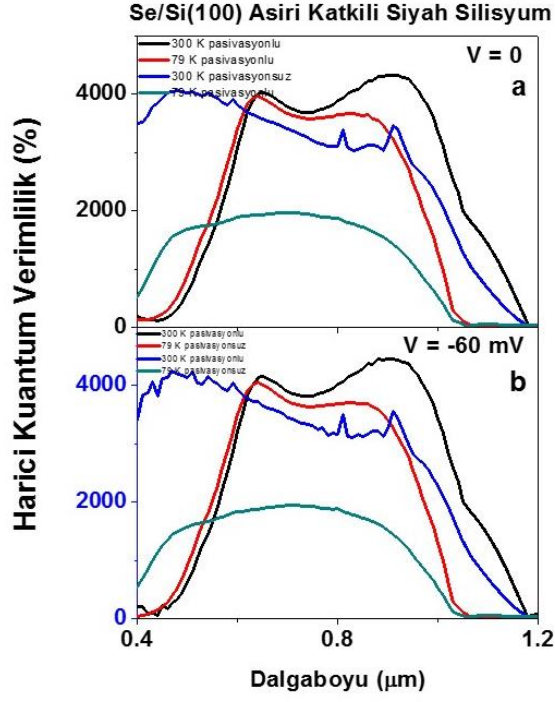
Benzer şekilde SiO₂ pasivasyonlu ve pasivasyonsuz örneklerin tepe tepkisellik grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.35'te verilmiştir. VIS & NIR tepkiselliğin iki kat, IR tepkiselliğinin ise yüz kat civarında arttığı gözlemlenmiştir.

Pasivasyon öncesi ve sonrası VIS & NIR için tepe tepkisellikleri, harici kuantum verimlilik ve D* değerleri Şekil 4.35, 4.36 ve 4.37'de verilmiştir.

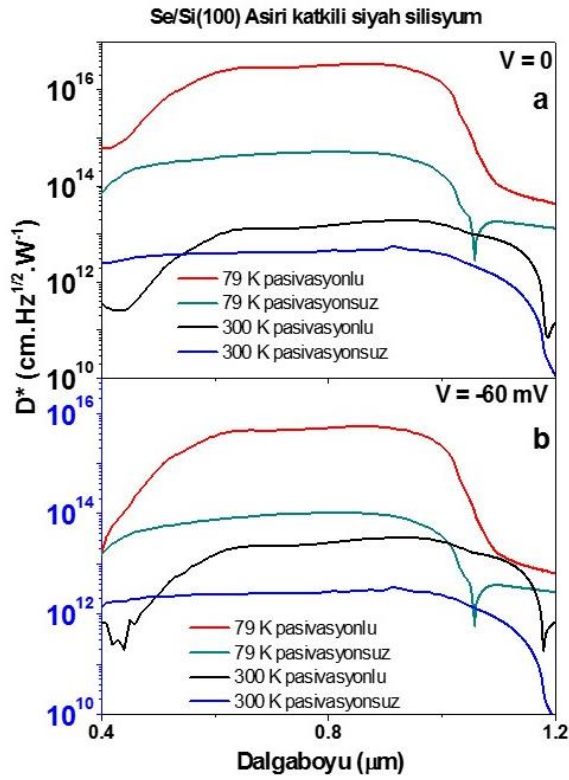


Şekil 4. 35: 79 K ve 300 K için pasivasyonlu ve pasivasyonsuz karşılaştırmalı VIS dalgaboyuna bağlı tepkisellikleri (a) 0V, (b) -60 mV

Şekil 4.35'e göre tepe tepkiselliği pasivasyon sonrasında oda sıcaklığında bir buçuk kat, 79 K sıcaklıkta ise iki kat artış göstermiştir.

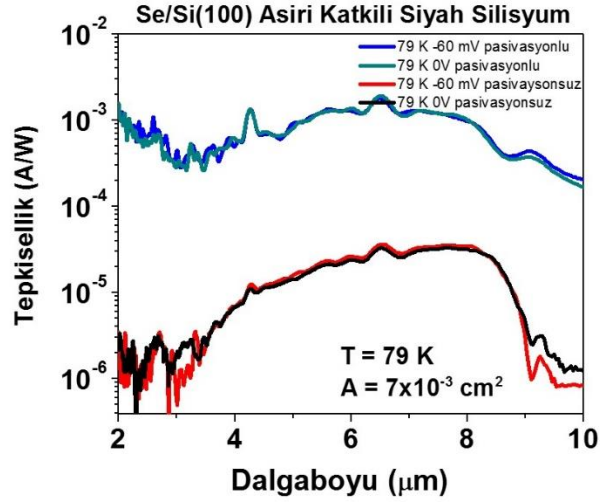


Şekil 4. 36: 79 K ve 300 K sıcaklıklar için pasivasyonlu ve pasivasyonsuz karşılaştırmalı (a) 0 V, (b) -60 mV için harici kuantum verimlilik grafikleri



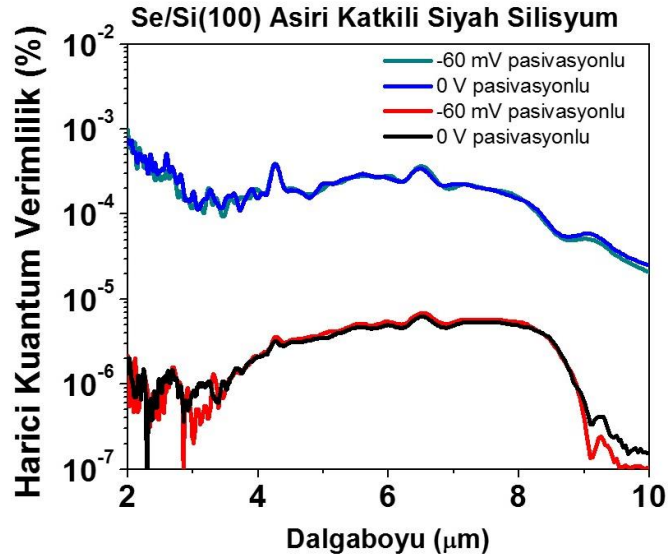
Şekil 4. 37: 79 ve 300 K için VIS & NIR D^* grafikleri (a) 0 V, (b) -60 mV

Şekil 4.37’de D^* değerlerinin yüzey pasivasyonu ile beraber VIS & NIR için oda sıcaklığında 1000 kat, 79 K sıcaklık için ise 100 kat arttığını söylemek mümkündür.



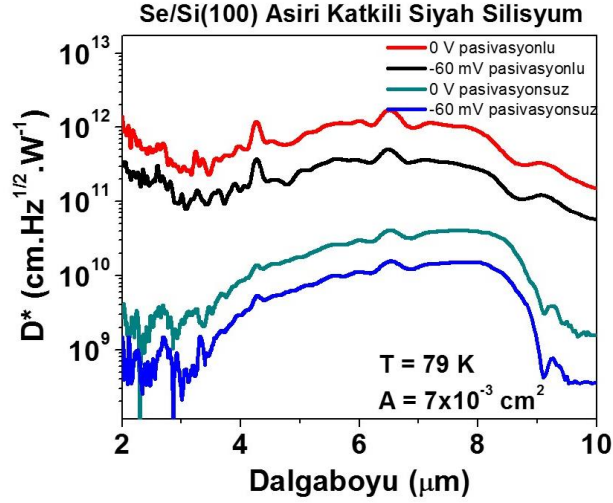
Şekil 4. 38: Se/Si(100) örneğin 79 K sıcaklıkta pasivasyonsuz ve pasivasyonlu 0 ve -60 mV gerilimde dalgaboyuna bağlı tepkisellikleri

Yine aynı şekilde IR bölge için harici kuantum verimlilikler ise Şekil 4.39’da verilmiştir. Harici kuantum veriminde de yüz kata varan bir artış olmuştur (Şekil 4.39).



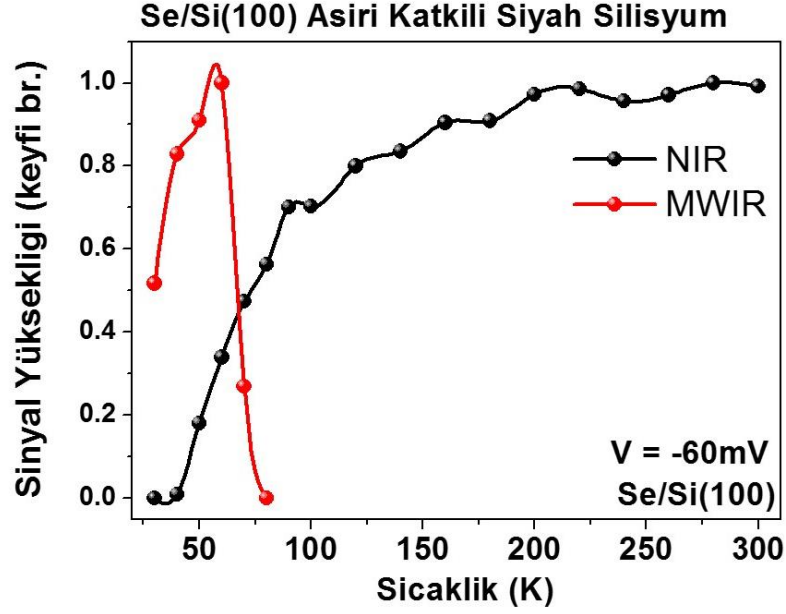
Şekil 4. 39: Se/Si(100) örneğin (a) pasivasyonsuz, (b) pasivasyonlu 0 ve -60 mV gerilimde harici kuantum verimlilikleri

Hem karanlık akımın azalması, hem de tepkiselliğin artması ile D^* değerlerinde IR için anlamlı bir artış meydana gelmiştir. D^* $10^{10} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ mertebelerinden $10^{12} \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ mertebesine yükselmiştir (Şekil 4.40).



Şekil 4. 40: Se/Si(100) örneğin (a) pasivasyonsuz, (b) pasivasyonlu, 79 K sıcaklıkta 0 ve -60 mV gerilimde pasivasyonlu dedektivite değerleri

Şekil 4.38 ve 4.39' ve 4.40'taki veriler, PECVD ile yapılmış SiO₂ pasivasyonunun tepe tepkiselliği ve dedektiviteyi 0 V gerilim altında 400 kata, bias altında ise 25 kata kadar arttırdığını göstermiştir. Ayrıca %100 kesim dalgaboyu da 9,5 μ m'den 10 μ m'ye artmıştır. Ayrıca pasivasyon işlemi sonrası ölçümlerdeki atmosferik soğurmalar, ölçüm yapılan temiz alandaki nem artışına ve bunun arka plan sinyaline etki etmesine bağlı olarak artmıştır. Pürüzlü silisyum yapı, yüzey kusurları buna bağlı olarak da açıkta kalan bağları (dangling bonds) fazla olduğu için rekombinasyon oranı oldukça fazladır. PECVD ile kaplanan SiO₂ bu açıkta kalan bağları başarılı bir şekilde örtmüştür ve yüzeye iyi bir pasivasyon sağlamıştır. Gelen fotonların zaten hâlihazırda tamamına yakını soğurulduğu ve absorptans çok yüksek olduğu için pürüzlü yüzeylerde pasivasyon, yaygın olarak kullanılan p-i-n fotodiyotların pasivasyonu ile kıyaslandığında çok daha etkilidir. Bu veriler ışığında sıcaklığa bağlı olarak elde edilen sinyallerin ve dolayısıyla tepe tepkiselliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi şekil 4.41'de verilmiştir.



Şekil 4. 41: Maksimum sinyal şiddetinin sıcaklığa göre değişimi

Sonuç olarak silisyum tabanlı arabanta sahip p-n eklemlerinin, p-i-n eklemlerinin aksine VIS/NIR bölge için çalışma sıcaklığında tepkiselliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun bir nedeni soğurma katsayısının sıcaklıkla artması, bununla beraber soğurulan foton miktarından kaynaklı daha çok akıma katkıda bulunan elektron – deşik çifti bulunması olabilir [128]. Ayrıca p-n fotodiyotlarda sıcaklıkla tepkisellik artışı beklenen bir şeydir [129].

IR bölgeye doğru gidildikçe katkı iyonlarından gelen IR sinyalinin etkisi azalmakta ve sinyal bozulmaktadır fakat NIR bölgede banttın banda geçişler baskındır. Bir yandan da kaçak akım sıcaklıkla arttığı için tepkisellik fazla bile olsa, D^* değerleri sıvı azot kaynama sıcaklığından daha düşük olmaktadır. Ancak yine de hem NIR hem MWIR & LWIR bantlarında bir sinyal gözlenmektedir. Öte yandan NIR bölgede kesilim dalgaboyu sıcaklıkla beraber daha uzun dalgaboylarında görülmektedir, çünkü iletkenlik ve değerlik bantları birbirine sıcaklıkla beraber yaklaşırlar [23]. Ayrıca PECVD ile yapılan pasivasyon işlemi de anlamlı aygıt performansını anlamlı şekilde arttırmaktadır.

5. SONUÇLAR

5.1 ATIMLI LAZER OPERASYONU

Bu tez çalışması kapsamında silisyum alt taş üzerine donör iyonların aşırı (Mott limit üzeri, 6×10^{19} üzeri) yerleştirilmesi sayesinde bir tek taraflı keskin eklem oluşturulmak istenmiştir. Lazer operasyonu ile yapı çok hızlı eritilip dondurularak yeniden kristallendirme yapılmış, donör iyonların bağ kurması sağlanmıştır. Bu yolla yasak bant aralığında harici enerji seviyelerinin sıklaşması sonucunda bir ara bant oluşturmuş ve daha düşük enerjili fotonların iletkenlik bandına geçerek bir MWIR ve LWIR spektrumunda bir fotoakım yaratılmasını sağlamıştır.

5.2 OPTİK ÖLÇÜMLER

Optik geçirgenlik ve yansıma ölçümleri sonucunda siyah silisyum örneğin hem kendi yüzey morfolojisi, hem de katkı iyonlarından dolayı ışığı çokça soğurduğu bilgisi elde edilmiştir. Bu durum, örnek yüzeyine gelen her bir fotonun bir elektron – deşik çifti oluşturması, buna bağlı olarak da kuantum verimin ve tepkiselliğin çokça yükselmesi anlamına gelmektedir.

5.3 MİKROFABRİKASYON

Piksel oluşturma sürecinde ıslak aşındırma ile üzerinde mikroyapı bulunan siyah silisyum ve bu yapıların bulunmadığı, yalnızca eritme ile kristallendirilmiş silisyum aygıt için mikrofabrikasyon optimizasyonu yapılmıştır. Si_3N_4 kaplı yüzeyin mikrofabrikasyon çözeltisi olan KOH'a daha dayanıklı olduğu anlaşılmıştır. 90 °C'de kütlece %60 KOH çözeltisinin pürüzlü yüzeyi düzleştirerek mesa aşındırması yaptığı, bunun dışında da pürüzsüz silisyum yüzeyinde de gayet kontrollü bir mesa aşındırması yaptığı gözlemlenmiştir. Islak aşındırma, gayet kontrollü ve etkili bir şekilde mikrofabrikasyon olanağı sağlamaktadır.

5.4 ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLER

Elektriksel olarak aygıttan mümkün olduğunca yüksek fotoakım elde edilmesi istenmektedir. Elektriksel ölçümler, karanlık akım, IR bölgede FTIR ile spektral tepki ve siyah cisim ile tepe tepkisellik ölçümleri, VIS bölgede ise monokromatör ile spektral olarak tepe tepkiselliği ölçümü ile incelenmiştir.

FTIR ile yapılan spektral NIR spektral ölçümünde spektral tepki oda sıcaklığında 0,7 – 1,2 µm arasında gözlemlenmiş, MWIR ve LWIR bantlarında ise oda sıcaklığında 3 – 10 µm arasında tepki gözlemlenmiştir. MWIR ve LWIR bantlarındaki sinyalin tepe tepkiselliği 450 °C'deki siyah cisimde ölçülmüş, 10^{-5} A/W mertebesinde tepe tepkiselliği elde edilmiştir. 950 °C'de yapılan NIR bölge için siyah cisim ölçümünde ise NIR'da pürüzlü örnek için sıfır gerilimde 20,4 A/W, pürüzsüz ölçümde ise 67,0 A/W tepkisellik ölçülmüştür. -60 mV gerilim altında ise pürüzlü örnek yüzeyi 20,6 A/W, pürüzsüz örnek yüzeyi için 68,1 A/W değerinde elde edilmiştir.

VIS bölgede yapılan monokromatör ile yapılan tepkisellik ölçümünde pürüzlü örneğin tepkisi 23 A/W, pürüzsüz örneğin tepkiselliği ise sıfır volt gerilimde 67,2 A/W olarak belirlenmiştir. Bundan dolayı VIS ve NIR bölgelerinde bu silisyum aygıtın yüksek tepkisellekle çalışması mümkündür. -60 mV için ise bu değerler 68,2 A/W değerindedir. 79 K için ise pürüzlü örneklerde tepkisellik sıfır gerilim altında 12,1 A/W, -60 mV gerilim altında 12,2 A/W değerindedir. Pürüzsüz örnekler için ise bu değer sırasıyla 56,4 A/W ve 59,2 A/W'dir.

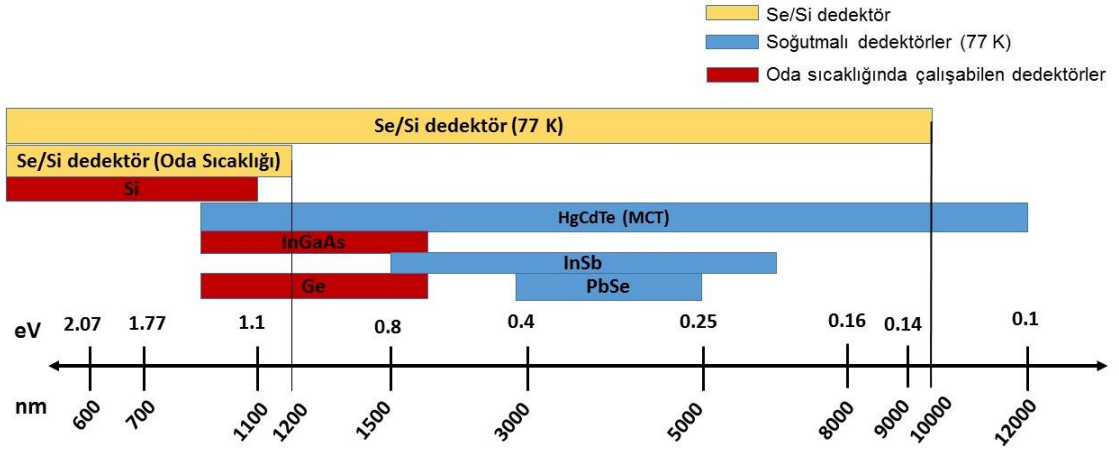
Yapılan karanlık akım – gerilim ölçümlerinde ise oda sıcaklığında 7×10^{-3} cm² optik alan için $26,6 \times 10^{-9}$ A, akım yoğunluğu olarak ise $3,81 \times 10^{-6}$ µA/cm²'dir. 79 K için ise aynı optik alan için karanlık akım $2,77 \times 10^{-15}$ A'dir. Akım yoğunluğu olarak ise bu $3,96 \times 10^{-13}$ A/cm² değerindedir.

5.5 YÜZEY PASİVASYONU

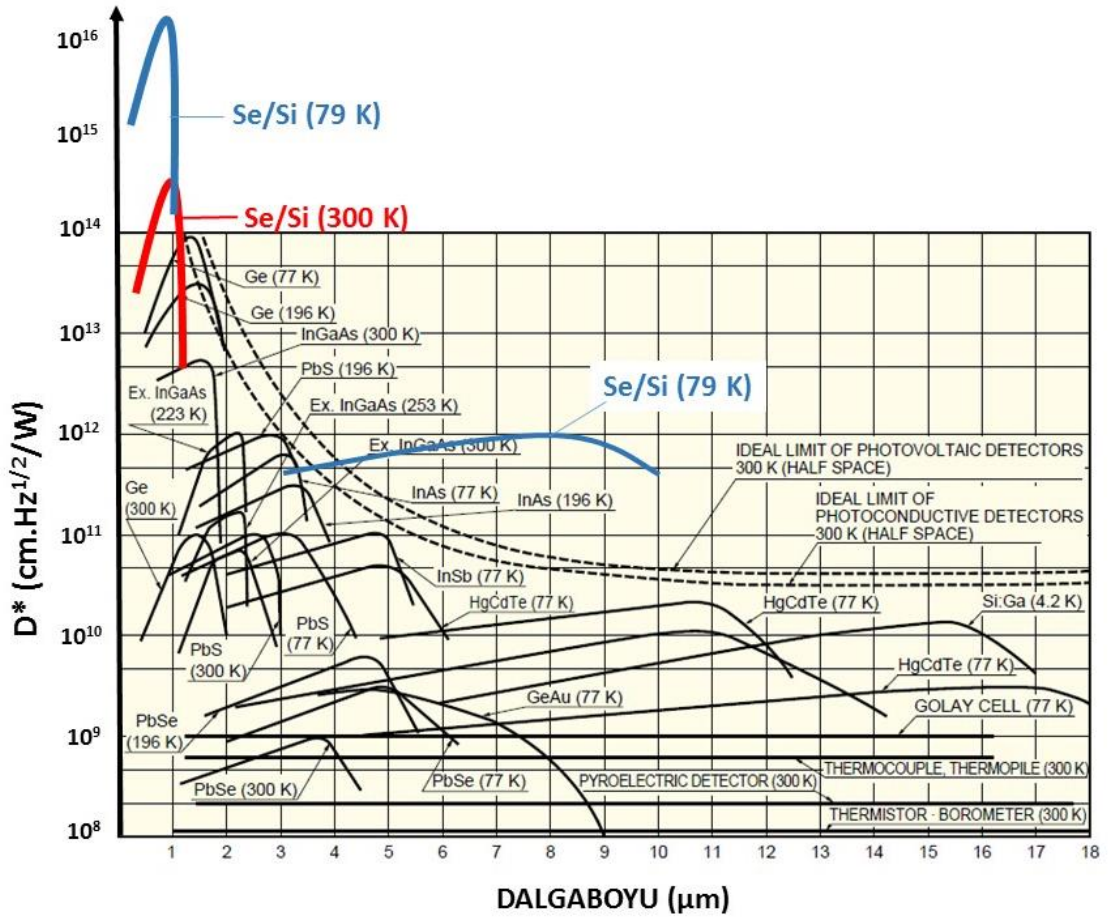
Pürüzlü siyah silisyum aygıtın yüzey pasivasyonunun yapılması ile yüzeyde açıkta kalan bağların doldurulması ile yüzeydeki kaçak akım merkezleri SiO₂ ile pasive edilmiştir. Böylece aygıttan elde edilen fotoakım miktarında yaklaşık yüz kat artış meydana gelmiştir. Bu nedenle aygıtın dedektivitesi de 10^{13} cm.Hz^{1/2}.W⁻¹ (Jones) mertebesine yükselmiştir. Dolayısıyla bu dedektörün gece görüş kamerası olarak kullanılması mümkündür. Pürüzlü silisyum aygıt, aynı zamanda görünür bölgede yüksek tepkisellik ile çalışabilme becerisine de sahip olduğu için bir güneş gözesi olarak kullanılması ve enerji alanında da faydalanılabilmesi mümkün olacaktır. Hatta bir adım daha ileri giderek üretilen silisyum aygıtın hem geceleri kamera, gündüzleri ise kendini şarj eden bir fotovoltaik aygıt olarak kullanılması sağlanabilir. Bütün bunların yanı sıra silisyum aygıt, görünür bölgedeki yüksek tepkiselliğinden kaynaklı 10^{14} cm.Hz^{1/2}.W⁻¹ mertebelerindeki çok yüksek dedektivite sonucunda görünür bölgede çalışan sensör olarak da kullanılabilir.

Ayrıca aşırı düşük karanlık akım değerleri sayesinde de takdirde farklı elektronik amaçlar için kullanmak mümkündür.

Diğer konvansiyonel aygıtlarla karşılaştırılacak olursa aşırı selenyum katkılı pürüzlü silisyum aygıt ayrıca pek çok gece görüş sensöründen daha geniş bir spektrumda da kullanılabilir.



Şekil 5.1: Bazı dedektörlerin ve kalkojen katmanlı silisyum tabanlı IR dedektörün farklı sıcaklıklarda çalıştırılabilir çalışma spektrumları (J. “Black Silicon for Next Generation Infrared Sensors” sunumundan yeniden uyarlanarak Se/Si spektrumu üzerine eklenmiştir)



Şekil 5. 2: Farklı dedektörlerin dedektiviteleri (Hamamatsu'dan alınan tabloya eklenmiştir) [130]

6. KAYNAKLAR

- [1] Ertekin, E., Winkler, M. T., Recht, D., Said, A. J., Aziz, M. J., Buonassisi, T., Grossman, J. C., Insulator-to-metal transition in selenium-hyperdoped silicon: Observation and origin, *Phys. Rev. Lett.*, 108, 2, 1–5, **2012**.
- [2] Dong, X., Wang, Y., Song, X., Wang, J., Li, X., First-principles study of crystalline silicon hyperdoped with cobalt at a concentration exceeding the Mott limit, 71303, **2016**.
- [3] Olea, J., Pastor, D., Toledano-Luque, M., San-Andrés, E., Mártil, I., González-Díaz, G., High quality Ti-implanted Si layers above solid solubility limit, *Proc. 2009 Spanish Conf. Electron Devices, CDE'09*, 103524, 2010, 38–41, **2009**.
- [4] García-Hemme, E., García-Hernansanz, R., Olea, J., Pastor, D., Del Prado, Á., Mártil, I., Wahnón, P., Sanchez, K., Palacios, P., González-Díaz, G., Double ion implantation and pulsed laser melting processes for third generation solar cells, *Int. J. Photoenergy*, 2013, **2013**.
- [5] Martí, A., López, N., Antolín, E., Cánovas, E., Stanley, C., Farmer, C., Cuadra, L., Luque, A., Novel semiconductor solar cell structures: The quantum dot intermediate band solar cell, *Thin Solid Films*, 511–512, 638–644, **2006**.
- [6] Wang, W., Intermediate Band Solar Cells based on ZnTeO, PhD thesis, University of Michigan, **2010**.
- [7] Martí, A., Antolín, E., Cánovas, E., López, N., Linares, P. G., Luque, A., Stanley, C. R., Farmer, C. D., Elements of the design and analysis of quantum-dot intermediate band solar cells, *Thin Solid Films*, 516, 20, 6716–6722, **2008**.
- [8] Luque, A., Martí, A., The intermediate band solar cell: Progress toward the realization of an attractive concept, *Adv. Mater.*, 22, 2, 160–174, **2010**.
- [9] Lin, Y.-T., Femtosecond-laser hyperdoping and texturing of silicon for photovoltaic applications, PhD thesis, Harvard University, **2014**.
- [10] Sánchez, K., Aguilera, I., Palacios, P., Wahnón, P., Assessment through first-principles calculations of an intermediate-band photovoltaic material based on Ti-implanted silicon: Interstitial versus substitutional origin, *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, 79, 16, 1–7, **2009**.
- [11] Luque, A., Martí, A., Stanley, C., Understanding intermediate-band solar cells, *Nat. Photonics*, 6, February, 146, **2012**.
- [12] Shockley, W., Queisser, H. J., Detailed balance limit of efficiency of p-n junction

- solar cells, *J. Appl. Phys.*, 32, 3, 510–519, **1961**.
- [13] Rühle, S., Tabulated values of the Shockley-Queisser limit for single junction solar cells, *Sol. Energy*, 130, 139–147, **2016**.
- [14] Martí, A., Antolín, E., Stanley, C. R., Farmer, C. D., López, N., Díaz, P., Cánovas, E., Linares, P. G., Luque, A., Production of photocurrent due to intermediate-to-conduction-band transitions: A demonstration of a key operating principle of the intermediate-band solar cell, *Phys. Rev. Lett.*, 97, 24, 1–4, **2006**.
- [15] Luque, A., Martí, A., Increasing the Efficiency of Ideal Solar Cells by Photon Induced Transitions at Intermediate Levels, *Phys. Rev. Lett.*, 78, 26, 5014–5017, **1997**.
- [16] Sher, M. J., Mangan, N. M., Smith, M. J., Lin, Y. T., Marbach, S., Schneider, T. M., Gradečak, S., Brenner, M. P., Mazur, E., Femtosecond-laser hyperdoping silicon in an SF₆ atmosphere: Dopant incorporation mechanism, *J. Appl. Phys.*, 117, 12, **2015**.
- [17] Sher, M., Intermediate Band Properties of Femtosecond-Laser Hyperdoped Silicon, May, **2013**.
- [18] Butz, S. D., *Science of Earth Systems*, 2nd ed. Clifton Park, NY: Thomson Delmar Learning, **2008**.
- [19] Rogalski, A., HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook, *Reports Prog. Phys.*, 68, 10, 2267–2336, **2005**.
- [20] Soref, R., Mid-infrared photonics in silicon and germanium, *Nat. Photonics*, 4, 8, 495–497, **2010**.
- [21] Suhling, J. C., Jaeger, R. C., Silicon piezoresistive stress sensors and their application in electronic packaging, *IEEE Sens. J.*, 1, 1, 14–30, **2001**.
- [22] Wikipedia, Silicon Photonics. https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_photonics.
- [23] Varshni, P., Temperature dependence of the energy gap in semiconductors, 2–7, **1967**.
- [24] Plis, E. A., Mid-IR Type-II InAs/GaSb Nanoscale Superlattice Sensors, PhD thesis, University of New Mexico, **2007**.
- [25] Wikipedia, Direct and indirect band gaps.: https://en.wikipedia.org/wiki/Direct_and_indirect_band_gaps, (Mart, **2009**).
- [26] PN Junction Diode and its Characteristics. <https://www.electrical4u.com/p-n-junction-diode/>, (**2011**)
- [27] Sze, S. M., *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, Second Edi. New

- Caledonia: John Wiley & Sons, **2006**.
- [28] Hu, C., PN and Metal-Semiconductor Junctions, in *Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuit*, 89–156, **2009**.
- [29] Smith, M. J., Lin, Y. T., Sher, M. J., Winkler, M. T., Mazur, E., Gradečak, S., Pressure-induced phase transformations during femtosecond-laser doping of silicon, *J. Appl. Phys.*, 110, 5, **2011**.
- [30] Thurber, W. R., Resistivity-Dopant Density Relationship for Phosphorus-Doped Silicon, *J. Electrochem. Soc.*, 127, 8, 1807, **1980**.
- [31] Winkler, M. T., Recht, D., Sher, M. J., Said, A. J., Mazur, E., Aziz, M. J., Insulator-to-metal transition in sulfur-doped silicon, *Phys. Rev. Lett.*, 106, 17, 1–4, **2011**.
- [32] Umezu, I., Kohno, A., Warrender, J. M., Takatori, Y., Hirao, Y., Nakagawa, S., Sugimura, A., Charnvanichborikarn, S., Williams, J. S., Aziz, M. J., Strong mid-infrared optical absorption by supersaturated sulfur doping in silicon, *AIP Conf. Proc.*, 1399, 51–52, **2011**.
- [33] Du, L., Wu, Z., Li, S., Hu, Z., Jiang, Y., First-principles calculations of properties for chalcogen (S, Se, Te) doped silicon, *Solid State Commun.*, 226, 1–4, **2016**.
- [34] Masetti, G., Severi, M., Solmi, S., Modeling of Carrier Mobility Against Carrier Concentration in Arsenic-, Phosphorus-, and Boron-Doped Silicon, *IEEE Trans. Electron Devices*, 30, 7, 764–769, **1983**.
- [35] Nishimura, H., Impurity Conduction in the Intermediate Concentration Region, *Phys. Rev.*, 138, 3A, A815–A821, **1965**.
- [36] Mott, N. F., Davis, E. A., Conduction in non-crystalline systems, *Philos. Mag.*, 17, 150, 1269–1284, **1968**.
- [37] Mott, N. F., Metal - Insulator Transition, *Rev. Mod. Phys.*, 40, 677–683, **1968**.
- [38] Mott, N. F., The Basis of the Electron Theory of Metals, with Special Reference to the Transition Metals, *Proc. Phys. Soc. Sect. A*, 62, 7, 416–422, **1949**.
- [39] Brown, A. S., Green, M. A., Impurity photovoltaic effect: Fundamental energy conversion efficiency limits, *J. Appl. Phys.*, 92, 3, 1329–1336, **2002**.
- [40] Carlson, R. O., Hall, R. N., Pell, E. M., Sulfur in silicon, *J. Phys. Chem. Solids*, 8, 81–83, **1959**.
- [41] Ertekin, E., Winkler, M. T., Recht, D., Said, A. J., Aziz, M. J., Buonassisi, T., Grossman, J. C., Insulator-to-metal transition in selenium-hyperdoped silicon: Observation and origin, *Phys. Rev. Lett.*, 108, 2, 2–6, **2012**.
- [42] Mott, N. F., Metal-insulator transition, *Rev. Mod. Phys.*, 40, 4, 677–683, **1968**.

- Chem. Solids*, 9, 325–329, **1959**.
- [57] Hamamatsu Photonics K. K., Infrared detectors, **2015**.
- [58] Avery, D. G., Goodwin, D. W., Lawson, W. D., Moss, T. S., Optical and Photo-Electrical Properties of Indium Antimonide, *Proc. Phys. Soc. B*, 67, 761, **1954**.
- [59] Li, X., Carey, J. E., Sickler, J. W., Pralle, M. U., Palsule, C., Vineis, C. J., Silicon photodiodes with high photoconductive gain at room temperature, *Opt. Express*, 20, 5, 5518, **2012**.
- [60] John David Vincent, *Fundamentals of Infrared Detector Operation and Testing*. John Wiley & Sons, **1989**.
- [61] Luque, A., Martí, A., Nozik, A. J., Solar Cells Based on Quantum Dots: Multiple Exciton Generation and Intermediate Bands, *MRS Bull.*, 32, 3, 236–241, **2007**.
- [62] Semonin, O. E., Luther, J. M., Choi, S., Chen, H.-Y., Gao, J., Nozik, A. J., Beard, M. C., Peak External Photocurrent Quantum Efficiency Exceeding 100% via MEG in a Quantum Dot Solar Cell, *Science (80-.)*, 334, 6062, 1530–1533, **2011**.
- [63] DiLello, N. A., Johnstone, D. K., Hoyt, J. L., Characterization of dark current in Ge-on-Si photodiodes, *J. Appl. Phys.*, 112, 5, 54506, **2012**.
- [64] Kutluer, K., Electrical, Optical, And Noise Characterizations Of MWIR Type-II InAs/GaSb Superlattice Single Pixel Detectors, Master's Thesis, Middle East Technical University, **2012**.
- [65] Ziegler, J. F., SRIM Tutorial 1 - Ion Ranges, Doses and Damage, **1984**.
- [66] Ziegler, J. F., *Ion Implantation Science and Technology*, Academic Press. **1984**.
- [67] Olea, J., Pastor, D., Toledano-Luque, M., Mártel, I., González-Díaz, G., Depth profile study of Ti implanted Si at very high doses, *J. Appl. Phys.*, 110, 6, **2011**.
- [68] Bob, B. P., Kohno, A., Charnvanichborikarn, S., Warrender, J. M., Umezu, I., Tabbal, M., Williams, J. S., Aziz, M. J., Fabrication and subband gap optical properties of silicon supersaturated with chalcogens by ion implantation and pulsed laser melting, *J. Appl. Phys.*, 107, 12, 1–5, **2010**.
- [69] Umezu, I., Warrender, J. M., Charnvanichborikarn, S., Kohno, A., Williams, J. S., Tabbal, M., Papazoglou, D. G., Zhang, X. C., Aziz, M. J., Emergence of very broad infrared absorption band by hyperdoping of silicon with chalcogens, *J. Appl. Phys.*, 113, 21, 1–7, **2013**.
- [70] Pérez, E., Dueñas, S., Castán, H., García, H., Bailón, L., Montero, D., García-Hernansanz, R., García-Hemme, E., Olea, J., Gonzalez-Díaz, G., A detailed analysis of the energy levels configuration existing in the band gap of

- supersaturated silicon with titanium for photovoltaic applications, *J. Appl. Phys.*, 118, 24, **2015**.
- [71] Shibata, T., Wakita, A., Sigmon, T. W., Gibbons, J. F., Metal-Silicon Reactions and Silicide Formation, in *Semiconductors and Semimetals vol . 17*, J. F. Gibbons, Ed. London: Academic Press, Inc., 343, **1984**.
- [72] Tabbal, M., Kim, T., Warrender, J. M., Aziz, M. J., Cardozo, B. L., Goldman, R. S., Formation of single crystal sulfur supersaturated silicon based junctions by pulsed laser melting, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 25, 6, 1847, **2007**.
- [73] Lin, Y. T., Mangan, N., Marbach, S., Schneider, T. M., Deng, G., Zhou, S., Brenner, M. P., Mazur, E., Creating femtosecond-laser-hyperdoped silicon with a homogeneous doping profile, *Appl. Phys. Lett.*, 106, 6, **2015**.
- [74] Tuckerman, D. B., Weisberg, a. H., Planarization of gold and aluminum thin films using a pulsed laser, *IEEE Electron Device Lett.*, 7, 1, 2–5, **1986**.
- [75] Magee, T. J., Osborne, J. F., Gildea, P., Leung, C. H., Laser planarization of nonrefractory metal during integrated circuit fabrication, *US4758533*, **1988**.
- [76] Yu, C., Doan, T. T., Sandhu, G. S., Method for Improving Step Coverage Of a Metallization Layer Other Publications On An Integrated Circuit By Use Of A High Melting Point Metal As An Anti-Reflective Coating During Laser Planarization, *US47585445032233*, **1991**.
- [77] Lu, J. Z., Luo, K. Y., Zhang, Y. K., Cui, C. Y., Sun, G. F., Zhou, J. Z., Zhang, L., You, J., Chen, K. M., Zhong, J. W., Grain refinement of LY2 aluminum alloy induced by ultra-high plastic strain during multiple laser shock processing impacts, *Acta Mater.*, 58, 11, 3984–3994, **2010**.
- [78] Steen, W. M., Poinell, J., Laser Surface Treatment, in *Laser Material Processing*, 2, March, Springer-Verlag London, 172–219, **1981**.
- [79] Mahmoudi, B., Torkamany, M. J., Aghdam, A. R. S. R., Sabbaghzade, J., Laser surface hardening of AISI 420 stainless steel treated by pulsed Nd:YAG laser, *Mater. Des.*, 31, 5, 2553–2560, **2010**.
- [80] Ashby, M. F., Easterling, K. E., The transformation hardening of steel surfaces by laser beams—I. Hypo-eutectoid steels, *Acta Metall.*, 32, 11, 1935–1948, **1984**.
- [81] Draper, C. W., Poate, J. M., Laser surface alloying, *Int. Met. Rev.*, 30, 1, 85–108, **1985**.
- [82] Yang, Y., Hu, J. D., Wang, H. Y., Liu, S. Y., Li, Y. X., Guo, Z. X., Ni–P amorphous phases obtained by Nd–YAG pulsed laser alloying of deposited Ni–P coating with

- aluminum, *Mater. Lett.*, 60, 9–10, 1128–1130, **2006**.
- [83] Fischer, P., Romano, V., Weber, H. P., Kolossov, S., Pulsed laser sintering of metallic powders, *Thin Solid Films*, 453–454, 139–144, **2004**.
- [84] Kruth, J. P., Wang, X., Laoui, T., Froyen, L., Lasers and materials in selective laser sintering, *Assem. Autom.*, 23, 4, 357–371, **2003**.
- [85] Ko, S. H., Pan, H., Grigoropoulos, C. P., Luscombe, C. K., Fréchet, J. M. J., Poulidakos, D., All-inkjet-printed flexible electronics fabrication on a polymer substrate by low-temperature high-resolution selective laser sintering of metal nanoparticles, *Nanotechnology*, 18, 34, 345202, **2007**.
- [86] Tzeng, Y., Parametric analysis of the pulsed Nd:YAG laser seam-welding process, *J. Mater. Process. Technol.*, 102, 1–3, 40–47, **2000**.
- [87] Zacharia, T., David, S. A., Vitek, J. M., Debroy, T., Heat transfer during Nd: Yag pulsed laser welding and its effect on solidification structure of austenitic stainless steels, *Metall. Trans. A*, 20, 5, 957–967, **1989**.
- [88] Luo, C., Lin, L., The application of nanosecond-pulsed laser welding technology in MEMS packaging with a shadow mask, *Sensors Actuators A Phys.*, 97–98, 398–404, **2002**.
- [89] Kruusing, A., Underwater and water-assisted laser processing: Part 2—Etching, cutting and rarely used methods, *Opt. Lasers Eng.*, 41, 2, 329–352, **2004**.
- [90] Brewer, P. D., McClure, D., Osgood, R. M., Dry, laser-assisted rapid HBr etching of GaAs, *Appl. Phys. Lett.*, 47, 3, 310, **1985**.
- [91] Hnatovsky, C., Taylor, R. S., Simova, E., Bhardwaj, V. R., Rayner, D. M., Corkum, P. B., Polarization-selective etching in femtosecond laser-assisted microfluidic channel fabrication in fused silica, *Opt. Lett.*, 30, 14, 1867, **2005**.
- [92] Kim, H., Piqué, A., Horwitz, J. ., Murata, H., Kafafi, Z. ., Gilmore, C. ., Chrisey, D. ., Effect of aluminum doping on zinc oxide thin films grown by pulsed laser deposition for organic light-emitting devices, *Thin Solid Films*, 377–378, 798–802, **2000**.
- [93] Park, S.-M., Ikegami, T., Ebihara, K., Effects of substrate temperature on the properties of Ga-doped ZnO by pulsed laser deposition, *Thin Solid Films*, 513, 1–2, 90–94, **2006**.
- [94] Mass, J., Bhattacharya, P., Katiyar, R. ., Effect of high substrate temperature on Al-doped ZnO thin films grown by pulsed laser deposition, *Mater. Sci. Eng. B*, 103, 1, 9–15, **2003**.

- [95] White, C. W., Wilson, S. R., Appleton, B. R., Young, F. W., Supersaturated substitutional alloys formed by ion implantation and pulsed laser annealing of group-III and group-V dopants in silicon, *J. Appl. Phys.*, 51, 1, 738–749, **1980**.
- [96] Emel'yanov, V. I., Babak, D. V., Defect capture under rapid solidification of the melt induced by the action of femtosecond laser pulses and formation of periodic surface structures on a semiconductor surface, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, 74, 6, 797–805, **2002**.
- [97] Reitano, R., Smith, P. M., Aziz, M. J., Solute trapping of group III, IV, and V elements in silicon by an aperiodic stepwise growth mechanism, *J. Appl. Phys.*, 76, 3, 1518, **1994**.
- [98] Tsu, R., Baglin, J. E., Tan, T. Y., Tsai, M. Y., Park, K. C., Hodgson, R., Laser recrystallization of ion-implanted Si by frequency-doubled Nd:YAG laser, *AIP Conf. Proc.*, 50, 344–350, **1979**.
- [99] Naito, M., Yamada, R., Machida, N., Koshiya, Y., Sugimura, A., Aoki, T., Umezu, I., Pulsed laser irradiation-induced microstructures in the Mn ion implanted Si, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, 365, 110–113, **2015**.
- [100] Zhou, S., Liu, F., Prucnal, S., Gao, K., Khalid, M., Baehtz, C., Posselt, M., Skorupa, W., Helm, M., Hyperdoping silicon with selenium: solid vs. liquid phase epitaxy., *Sci. Rep.*, 5, 8329, **2015**.
- [101] Sher, M.-J., Winkler, M. T., Mazur, E., Pulsed-laser hyperdoping and surface texturing for photovoltaics, *MRS Bull.*, 36, 6, 439–445, **2011**.
- [102] Giustina, M., Characterizing Photoresponse in Black Silicon at Excitation Below the Silicon Bandgap, Dartmouth College Hanover, .Sc thesis, **2010**.
- [103] Korkmaz, M., Orta-Kızılötesi Dalgaboyunda Çalışan InAs/GaSb Süperörgü Fotodiyotların Opto-Elektronik Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, **2014**.
- [104] Jovanović, V., Milosavljević, S., Sub-100 nm silicon-nitride hard-mask for high aspect-ratio silicon fins, in *MIPRO 2007 International Conference*, 31, 0, 62–66, **2007**.
- [105] Sato, K., Shikida, M., Matsushima, Y., Yamashiro, T., Asaumi, K., Iriye, Y., Yamamoto, M., Characterization of anisotropic etching properties of single-crystal silicon: effects of KOH concentration on etching profiles, *Proc. IEEE Tenth Annu. Int. Work. Micro Electro Mech. Syst. An Investig. Micro Struct. Sensors*,

- Actuators, Mach. Robot.*, 61, 87–93, **1997**.
- [106] Zubel, I., Kramkowska, M., The effect of alcohol additives on etching characteristics in KOH solutions, *Sensors Actuators, A Phys.*, 101, 3, 255–261, **2002**.
- [107] Zubel, I., Kramkowska, M., The effect of isopropyl alcohol on etching rate and roughness of (100) Si surface etched in KOH and TMAH solutions, *Sensors Actuators, A Phys.*, 93, 2, 138–147, **2001**.
- [108] Sher, M. J., Mazur, E., Intermediate band conduction in femtosecond-laser hyperdoped silicon, *Appl. Phys. Lett.*, 105, 3, 2012–2017, **2014**.
- [109] Repo, P., Benick, J., Vähänissi, V., Schön, J., Von Gastrow, G., Steinhauser, B., Schubert, M. C., Hermle, M., Savin, H., N-type black silicon solar cells, *Energy Procedia*, 38, August 2015, 866–871, **2013**.
- [110] Savin, H., Repo, P., von Gastrow, G., Ortega, P., Calle, E., Garín, M., Alcubilla, R., Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency, *Nat. Nanotechnol.*, 10, 7, 624–628, **2015**.
- [111] Banerjee, S., Su, P., Dahal, R., Bhat, I. B., Bergeson, J. D., Blissett, C., Aqariden, F., Hanyaloglu, B., Surface Passivation of HgCdTe Using Low-Pressure Chemical Vapor Deposition of CdTe, 43, 8, 3012–3017, **2014**.
- [112] Bacioğlu, A., PECVD-Silisyum-Altoksit ($a\text{-SiO}_x\text{:H}$, $x < 2$) İnce Filmlerde Fotoluminesans İşleyişleri, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, **2006**.
- [113] Tabbal, M., Kim, T., Woolf, D. N., Shin, B., Aziz, M. J., Fabrication and sub-band-gap absorption of single-crystal Si supersaturated with Se by pulsed laser mixing, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, 98, 3, 589–594, **2010**.
- [114] Iqbal, Z., Veprek, S., Raman scattering from hydrogenated microcrystalline and amorphous silicon, *J. Phys. C Solid State Phys.*, 15, 377–392, **1982**.
- [115] Parker, J. H., Feldman, D. W., Ashkin, M., Raman scattering by Silicon and Germanium, *Phys. Rev.*, 155, 3, 712–714, **1967**.
- [116] Schwarz-Selinger, T., Cahill, D. G., Chen, S.-C., Moon, S.-J., Grigoropoulos, C. P., Micron-scale modifications of Si surface morphology by pulsed-laser texturing, *Phys. Rev. B*, 64, 15, 155323, **2001**.
- [117] Tauc, J., Optical properties and electronic structure of amorphous Ge and Si, *Mater. Res. Bull.*, 3, 1, 37–46, **1968**.
- [118] Rüzgar, K., Hidrojenlendirilmiş Nanokristal Silisyum Alt-Oksit ($nc\text{-SiO}_x\text{:H}$, $x < 1$) İnce Filmlerin Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe

Üniversitesi, **2015**.

- [119] Morita, M., Ohmi, T., Hasegawa, E., Kawakami, M., Ohwada, M., Growth of native oxide on a silicon surface, *J. Appl. Phys.*, 68, 3, 1272, **1990**.
- [120] Fowlkes, J. D., Pedraza, A. J., Lowndes, D. H., Microstructural evolution of laser-exposed silicon targets in SF₆ atmospheres, *Appl. Phys. Lett.*, 77, 11, 1629, **2000**.
- [121] Judge, J. S., A Study of the Dissolution of SiO₂ in Acidic Fluoride Solutions, *J. Electrochem. Soc.*, 118, 11, 1772, **1971**.
- [122] Levine, B. F., Bethea, C. G., Hasnain, G., Shen, V. O., High sensitivity low dark current 10 μm GaAs quantum well infrared photodetectors, 851, 3–6, **1990**.
- [123] Liu, H. C., Steele, A. G., Buchanan, M., Wasilewski, Z. R., Liu, H. C., Steele, A. G., Buchanan, M., Wasilewski, Z. F., Dark current in quantum well infrared photodetectors Dark current in quantum well infrared photodetectors, 2029, 1993, **2002**.
- [124] Vurgaftman, I., Aifer, E. H., Canedy, C. L., Tischler, J. G., Meyer, J. R., Graded band gap for dark-current suppression in long-wave infrared W- structured type-II superlattice photodiodes Graded band gap for dark-current suppression in long-wave infrared W-structured type-II superlattice photodiodes, 121114, 10–13, **2006**.
- [125] Tansel, T., Kutluer, K., Muti, A., Salihoglu, Ö., Aydinli, A., Turan, R., Surface Recombination Noise in InAs/GaSb Superlattice Photodiodes, *Appl. Phys. Express*, 6, 3, 32202, **2013**.
- [126] Sullivan, J. T., Simmons, C. B., Buonassisi, T., Krich, J. J., Targeted Search for Effective Intermediate Band Solar Cell Materials, *IEEE J. Photovoltaics*, 5, 1, 212–218, **2015**.
- [127] Said, A. J., Recht, D., Sullivan, J. T., Warrender, J. M., Buonassisi, T., Persans, P. D., Aziz, M. J., Extended infrared photoresponse and gain in chalcogen-supersaturated silicon photodiodes, *Appl. Phys. Lett.*, 99, 7, 4–6, **2011**.
- [128] Dash, W. C., Newman, R., Intrinsic optical absorption in single-crystal germanium and silicon at 77 K and 300 K, *Phys. Rev.*, 99, 4, 1151–1155, **1955**.
- [129] Staller, C., Niblack, C., Smith, D., Responsivity of Silicon Photodiodes from 0.5 to 1.1 μm at 77 K, I, **1988**.
- [130] Hamamatsu Photonics K. K., Characteristics and use of infrared detectors, Hamamatsu City, **2011**.
- [131] Jansen, H., Gardeniers, H., Boer, M. De, Elwenspoek, M., Fluitman, J., A survey on the reactive ion etching of silicon in microtechnology, *J. Micromechanics*

Microengineering, 6, 14–28, **1996**.

- [132] Black Silicon SEM image. : <http://image-sensors-world.blogspot.fi/2015/09/black-silicon-presentation.html> (Eylül, **2015**)

EKLER

EK 1: SİYAH SİLİSYUM

Optoelektronik aygıtlar (güneş gözeleri, fotodedektörler, vb.) gelen fotonlardan maksimum verim sağlayabilmek için gelen fotonların tamamının bir elektron – hol çifti oluşturması beklenmektedir. Böylece aygıtın ürettiği fotoakım ve aygıtın verimi artacaktır. Bunun için genellikle yansıtma (antireflective) kaplamalar tercih edilmektedir.

Siyah silisyum, yüzeyinde oluşan mikro yapılar sayesinde ışık geometrik olarak tuzaklanmakta, ışığın geçirgenliği (transmittance – T) ve yansımaları (reflectance – R) çokça azalmakta ve bu sebeple geniş spektrumda katkısız silisyuma göre çok daha yüksek bir soğurma kabiliyetine sahiptir.

$$A = 1 - T - R$$

esitliğine göre geçirgenliğin ve yansımaların çok düşük olması, soğurmayı çokça arttırmaktadır. Sülfür (S), selenyum (Se) ve tellür (Te) katkı iyonlarının gelen fotonları soğurmasının arttırması, görünür ve kızılötesi bölgede %100'e yakın bir optik soğurma kabiliyeti mevcuttur. Elektriksel olarak ise silisyumun özelliklerinden düşük karanlık akım değerleri, yüksek fototepki, kuantum verimlilik ve dedektiviteye sahip bir malzemedir. Bu nedenle son yıllarda üzerine yapılan ar-ge çalışmaları çokça artmış, fotodedektör alanında da yüksek dedektivite değerleri elde edilmiş, özellikle fotodedektör endüstrisinde ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır.

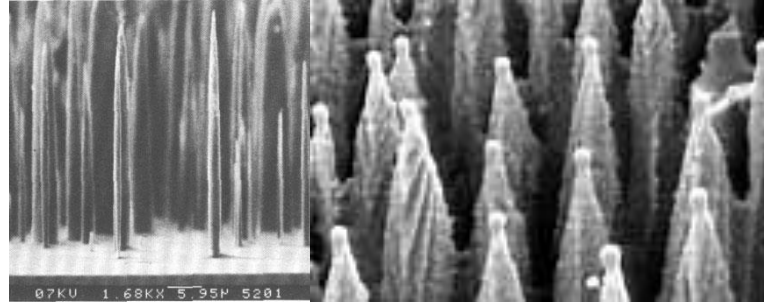
Silisyumun kullanışlı optik ve elektriksel özellikleri olan bir varyasyonu da siyah silisyum (b-Si) adı verilen malzemedir. Bu malzeme, yüzeyine gelen ışığın tamamına yakını bünyesinde hapsedmekte, bu nedenle de gelen ışıktan maksimum fayda sağlamaktadır; dolayısıyla güneş enerjisi ve fotodedektör sistemlerinde oldukça kullanışlı olduğunu söylemek yerinde olacaktır [42].

Siyah silisyum, bir silisyum varyasyonu olan bir malzemedir. Silisyum, bilindiği üzere, indirekt bant aralığına sahip bir malzemedir ve yasak bant aralığı 1,1 eV'dir. Bu da $\lambda = 1,12 \mu\text{m}$ dalgaboyuna tekabül etmektedir. Bu enerji ve dalgaboyunda gelen fotonlar, katkısız silisyumun değerlik elektronlarını uyarabilmektedirler. Ancak bu enerjiden daha

küçük dalgaboylu fotonlar silisyum üzerinde herhangi bir etki yaratmamaktadırlar. Siyah silisyum, kristal silisyuma göre bir miktar daha fazla ışığı soğurmakta ve daha fazla etki göstermektedir.

Siyah silisyum birkaç farklı yöntem ile elde edilebilir. Bu yöntemlerden birincisi, siyah silisyumun keşfi niteliğinde olan reaktif iyon aşındırması (RIE) ile mümkündür. Bu yöntemde flor tabanlı plazma maskelenmiş yüzeye ($SF_6/O_2/CHF_3$) uygulanarak yüzeyden içeriye doğru ışığı tuzaklayacak mikro yapılar oluşmaktadır. Bu yapılar gelen ışığın yansımalarına izin vermemeyerek ışığı kendi içinde hapsedmektedirler.

Bir diğer yöntem olarak ise SF_6 gazı altında femtosaniye lazer yoluyla yüzeye atış yaparak yüzeyde oluşturulan mikro yapılar sayesinde elde edilen siyah silisyumdur. SF_6 gazı altında yapılan bu siyah silisyum işleminde, femtosaniye lazeri, silisyumun SF_6 ile tepkimesini hızlandırmaktadır. Tepkime sonucunda silisyum serbest kalan sülfür, silisyum yüzeyine katkı iyonu olarak tutunmakta, flor iyonları ise silisyumu aşındırma işlevini üstlenmektedir. Gazın basıncına bağlı olarak ise sülfür iyonlarının katkılanma miktarı değişmektedir [16].



Şekil Ek 1. 1: (a) RIE ile oluşturulan siyah silisyum SEM görüntüsü [131]
Femtosaniye lazer ile oluşturulmuş lazer görüntüsü ([132], fotoğrafın orijinali SiOnyx (ABD) firmasında çekilmiştir)

Esasen oluşturulmak istenen yapı siyah silisyum olup, nanosaniye lazer ve argon gazı altında denemeler yapılmıştır. Ancak bu yapıyı oluşturmak için deneyler devam etmektedir.

EK 2: İYON YERLEŞİMİ DERİNLİĞİ İÇİN SRIM HESAPLAMALARI

SRIM ve TRIM programları ile iyonların dağılımları program çıktısı tablolar ile verilmiştir.



Şekil Ek 2. 1: SRIM programı ekran görüntüsü

İyon Enerjisi (keV)	dE/dx elek.	dE/dx nükleer	Öngörülen Menzil (Å)	Boyuna Dağılım (Å)	Yanal Dağılım (Å)
150,00	$2,362 \times 10^2$	$1,228 \times 10^3$	975	270	209

Tablo 3. SRIM'e göre 150 keV altında silisyum örgüde Se iyonlarının menzili

Simülasyon aşamasında ise *Transport of Ions in Matter (TRIM)* programı kullanılmıştır.

SRIM versiyon ---> SRIM-2013.00

Hesaplama Tarihi ---> 03 Temmuz 2016

=====

Yazdırılan Dosya Adı = SRIM Outputs\Selenium in Silicon.txt

İyon = Selenyum [34] , Kütle = 79.92 akb

Hedef Yoğunluğu = 2.3212E+00 g/cm³ = 4.9770E+22 atom/cm³

===== Hedef Bileşimi =====

Atom Adı	Atom No	Atomik Yüzde	Kütlece Yüzde
---	---	-----	-----
Si	14	100.00	100.00

=====

Bragg Düzeltmesi = 0.00%

Durdurma Birimleri = keV / mikron

Diğer durdurma birimleri için tablonun altına bakınız

İyon Enerjisi	dE/dx Elek.	dE/dx Nükleer	Hedeflenen Menzil	Boyuna Dağılım	Yanal Dağılım
-----	-----	-----	-----	-----	-----
10.00 keV	6.099E+01	9.645E+02	124 A	46 A	35 A
11.00 keV	6.397E+01	9.882E+02	132 A	48 A	37 A

12.00 keV	6.681E+01	1.009E+03	139 A	50 A	38 A
13.00 keV	6.954E+01	1.029E+03	147 A	53 A	40 A
14.00 keV	7.217E+01	1.046E+03	154 A	55 A	42 A
15.00 keV	7.470E+01	1.062E+03	161 A	57 A	44 A
16.00 keV	7.715E+01	1.077E+03	168 A	59 A	45 A
17.00 keV	7.952E+01	1.090E+03	175 A	61 A	47 A
18.00 keV	8.183E+01	1.103E+03	182 A	63 A	49 A
20.00 keV	8.626E+01	1.125E+03	196 A	67 A	52 A
22.50 keV	9.149E+01	1.149E+03	212 A	72 A	56 A
25.00 keV	9.644E+01	1.169E+03	229 A	77 A	60 A
27.50 keV	1.011E+02	1.186E+03	245 A	81 A	63 A
30.00 keV	1.056E+02	1.201E+03	261 A	86 A	67 A
32.50 keV	1.100E+02	1.213E+03	277 A	90 A	70 A
35.00 keV	1.141E+02	1.224E+03	292 A	95 A	74 A
37.50 keV	1.181E+02	1.233E+03	308 A	99 A	77 A
40.00 keV	1.220E+02	1.241E+03	323 A	103 A	81 A
45.00 keV	1.294E+02	1.254E+03	354 A	112 A	87 A
50.00 keV	1.364E+02	1.264E+03	384 A	120 A	94 A
55.00 keV	1.430E+02	1.271E+03	414 A	128 A	100 A
60.00 keV	1.494E+02	1.275E+03	443 A	136 A	106 A
65.00 keV	1.555E+02	1.278E+03	473 A	144 A	112 A
70.00 keV	1.614E+02	1.280E+03	503 A	152 A	118 A
80.00 keV	1.725E+02	1.280E+03	562 A	167 A	130 A
90.00 keV	1.830E+02	1.277E+03	621 A	182 A	142 A

100.00 keV	1.929E+02	1.272E+03	679 A	197 A	153 A
110.00 keV	2.023E+02	1.265E+03	738 A	212 A	165 A
120.00 keV	2.113E+02	1.257E+03	797 A	227 A	176 A
130.00 keV	2.199E+02	1.248E+03	856 A	241 A	187 A
140.00 keV	2.282E+02	1.238E+03	916 A	256 A	198 A
150.00 keV	2.362E+02	1.228E+03	975 A	270 A	209 A
160.00 keV	2.443E+02	1.218E+03	1035 A	285 A	220 A
170.00 keV	2.689E+02	1.207E+03	1095 A	299 A	231 A
180.00 keV	2.889E+02	1.196E+03	1154 A	312 A	242 A
200.00 keV	3.188E+02	1.175E+03	1272 A	339 A	263 A
225.00 keV	3.439E+02	1.148E+03	1420 A	373 A	290 A
250.00 keV	3.617E+02	1.123E+03	1569 A	405 A	316 A
275.00 keV	3.762E+02	1.098E+03	1720 A	438 A	342 A
300.00 keV	3.896E+02	1.073E+03	1872 A	470 A	367 A
325.00 keV	4.030E+02	1.050E+03	2026 A	502 A	393 A
350.00 keV	4.167E+02	1.028E+03	2181 A	533 A	419 A
375.00 keV	4.309E+02	1.007E+03	2337 A	564 A	444 A
400.00 keV	4.454E+02	9.868E+02	2494 A	595 A	470 A
450.00 keV	4.753E+02	9.488E+02	2811 A	656 A	521 A
500.00 keV	5.055E+02	9.140E+02	3131 A	716 A	572 A
550.00 keV	5.355E+02	8.819E+02	3452 A	774 A	622 A
600.00 keV	5.649E+02	8.524E+02	3775 A	830 A	672 A
650.00 keV	5.936E+02	8.251E+02	4098 A	885 A	722 A
700.00 keV	6.215E+02	7.998E+02	4422 A	938 A	772 A

800.00 keV	6.748E+02	7.542E+02	5069 A	1042 A	870 A
900.00 keV	7.252E+02	7.144E+02	5715 A	1140 A	965 A
1.00 MeV	7.730E+02	6.792E+02	6358 A	1232 A	1059 A
1.10 MeV	8.189E+02	6.479E+02	6997 A	1320 A	1150 A
1.20 MeV	8.631E+02	6.198E+02	7631 A	1403 A	1239 A
1.30 MeV	9.062E+02	5.944E+02	8260 A	1482 A	1325 A
1.40 MeV	9.483E+02	5.714E+02	8882 A	1557 A	1409 A
1.50 MeV	9.898E+02	5.503E+02	9498 A	1628 A	1491 A
1.60 MeV	1.031E+03	5.310E+02	1.01 um	1696 A	1570 A
1.70 MeV	1.071E+03	5.132E+02	1.07 um	1760 A	1647 A
1.80 MeV	1.111E+03	4.968E+02	1.13 um	1821 A	1722 A
2.00 MeV	1.191E+03	4.673E+02	1.25 um	1938 A	1865 A
2.25 MeV	1.291E+03	4.357E+02	1.39 um	2071 A	2032 A
2.50 MeV	1.390E+03	4.087E+02	1.52 um	2189 A	2187 A
2.75 MeV	1.489E+03	3.853E+02	1.65 um	2295 A	2330 A
3.00 MeV	1.588E+03	3.648E+02	1.78 um	2389 A	2462 A
3.25 MeV	1.686E+03	3.466E+02	1.90 um	2474 A	2585 A
3.50 MeV	1.784E+03	3.304E+02	2.02 um	2550 A	2699 A
3.75 MeV	1.881E+03	3.158E+02	2.13 um	2620 A	2806 A
4.00 MeV	1.977E+03	3.027E+02	2.24 um	2683 A	2905 A
4.50 MeV	2.165E+03	2.797E+02	2.44 um	2800 A	3084 A
5.00 MeV	2.347E+03	2.604E+02	2.64 um	2899 A	3241 A
5.50 MeV	2.521E+03	2.439E+02	2.82 um	2984 A	3380 A
6.00 MeV	2.688E+03	2.296E+02	2.99 um	3057 A	3505 A

6.50 MeV	2.846E+03	2.171E+02	3.15 um	3122 A	3617 A
7.00 MeV	2.996E+03	2.060E+02	3.31 um	3179 A	3719 A
8.00 MeV	3.272E+03	1.872E+02	3.61 um	3289 A	3897 A
9.00 MeV	3.518E+03	1.719E+02	3.88 um	3380 A	4049 A
10.00 MeV	3.738E+03	1.592E+02	4.14 um	3458 A	4181 A

Multiply Stopping by for Stopping Units

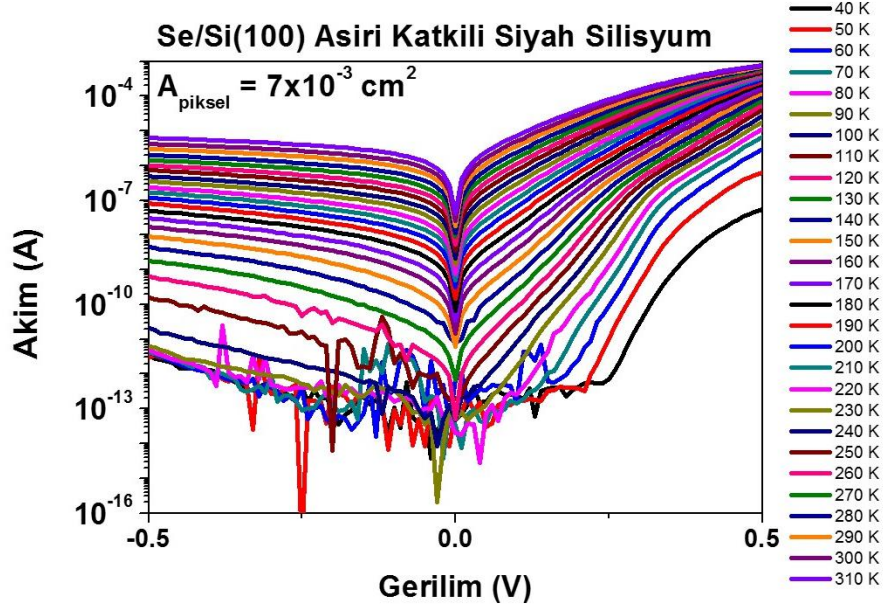
-----	-----
1.0000E-01	eV / Angstrom
1.0000E+00	keV / mikron
1.0000E+00	MeV / mm
4.3083E-03	keV / (ug/cm ²)
4.3083E-03	MeV / (mg/cm ²)
4.3083E+00	keV / (mg/cm ²)
2.0093E-01	eV / (1E15 atom/cm ²)
2.7222E-04	L.S.S. indirgenen birimler

=====

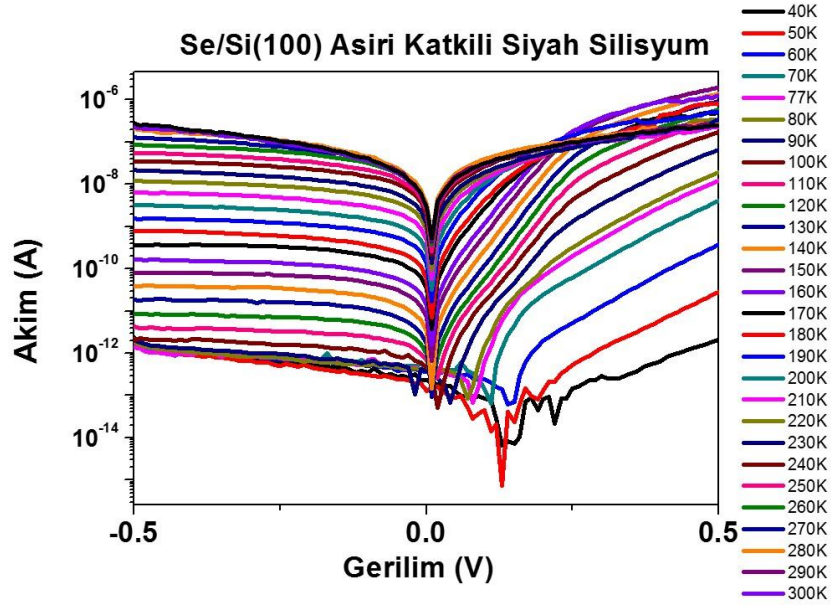
====

(C) 1984,1989,1992,1998,2008 J.P. Biersack ve J.F. Ziegler tarafından yapılmıştır.

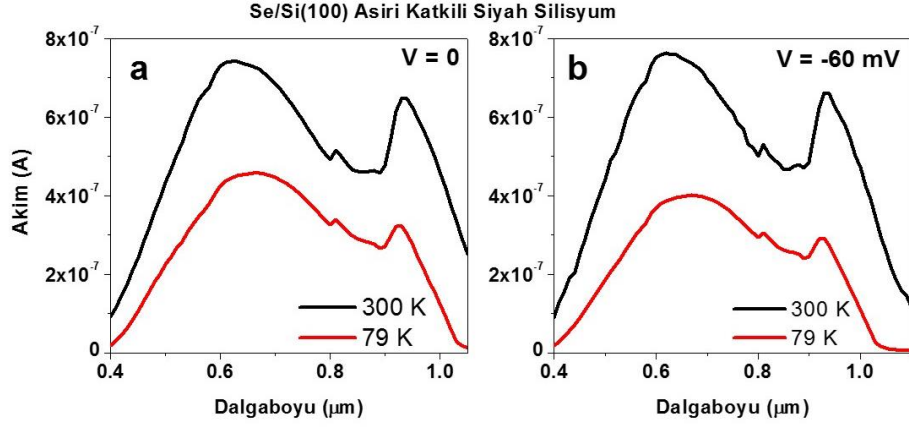
EK 3: SICAKLIĞA BAĞLI AKIM – GERİLİM, SPEKTRAL TEPKİ, TEPE TEPKİSELLİK GRAFİKLERİ



Şekil Ek 3. 1: Se/Si(100) aşırı katkılı siyah silisyum aygıt 40 – 300 K arası, 10 K farkla ölçülen akım – gerilim ölçümleri (pasivasyonsuz)

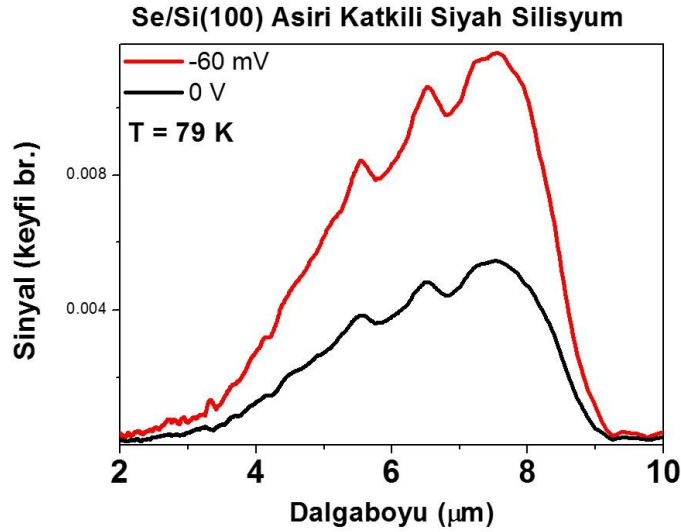


Şekil Ek 3. 2: Se/Si(100) aşırı katkılı siyah silisyum aygıt 40 - 300 K arası 10 K farkla akım gerilim ölçümleri (pasivasyonlu)



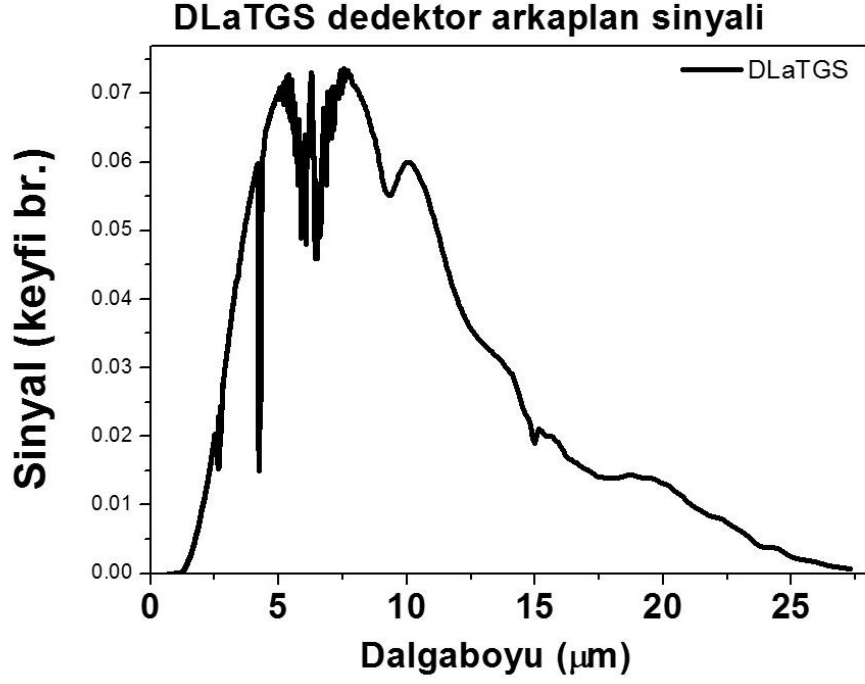
Şekil Ek 3.3: (a) 0 V, (b) -60 mV gerilim altında VIS bölgede Se/Si(100) aygıtın fotoakım ölçümü

Aşırı katkılı siyah silisyum aygıttan FTIR spektral ölçümlerinden 79 K sıcaklıkta MWIR ve LWIR bantlarında elde edilen sinyal Şekil 3.4'te verilmiştir.



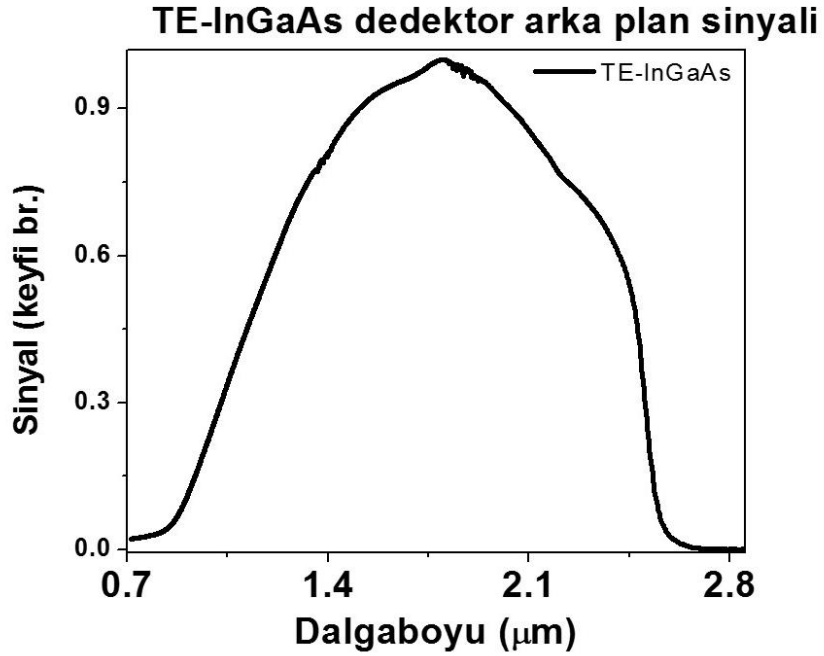
Şekil Ek 3. 4: FTIR spektral tepki sinyalleri

FTIR spektral ölçümlerinden MWIR ve LWIR bantlarında alınan sinyallerin arka planı için ise DLaTGS dedektörü kullanılmıştır. DLaTGS dedektörünün aldığı sinyal şekil Ek 3.5'te verilmiştir.



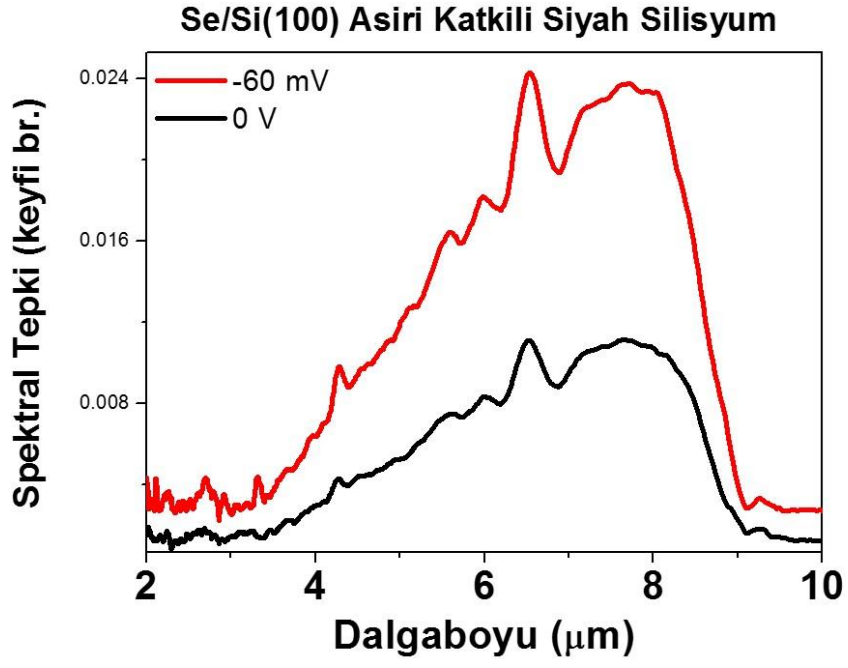
Şekil Ek 3. 5: DLaTGS arka plan sinyali

FTIR NIR bölge ölçümlerinde ise TE-InGaAs dedektör arka plan sinyali kullanılmıştır (Şekil 3.6)

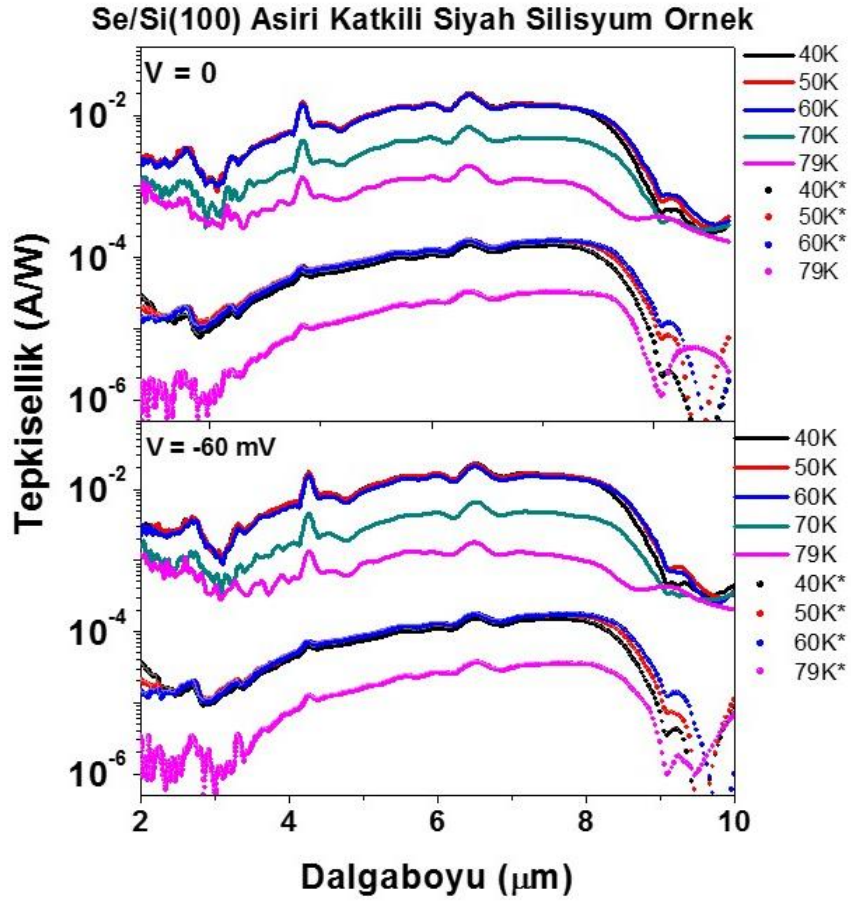


Şekil Ek 3. 6: TE-InGaAs dedektör arka plan sinyali

Se/Si(100) aşırı katkılı siyah silisyum aygıttan alınan FTIR spektral tepkisi MWIR ve LWIR bantları için Şekil 3.7’de belirtilmiştir.

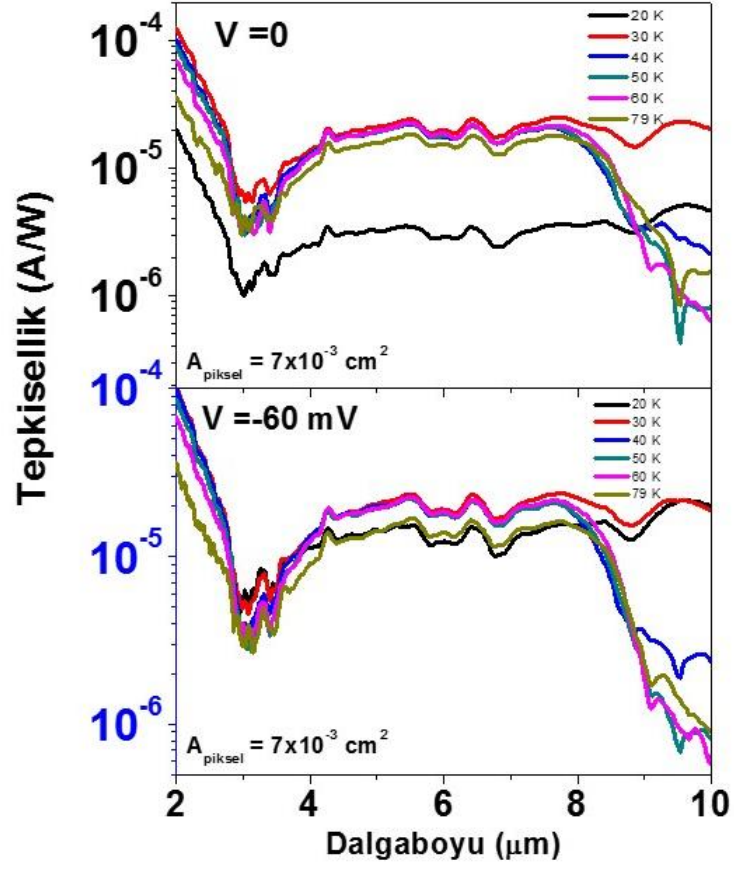


Şekil Ek 3. 7: MWIR ve LWIR bantlarında aygıtın spektral tepkisi



Şekil Ek 3. 8: Se/Si(100) asiri katkili siyah silisyum örneklerin 40 - 79 K arası IR tepe tepkisellikleri

Lazer enerji yoğunluğu $J = 1,7 \text{ cm}^2$ (3 kez) + $1,8 \text{ J/cm}^2$ (tek)
 $I = 15,5 \text{ A}$ & $15,6 \text{ A}$, $f = 15 \text{ kHz}$, atım sayısı: 1)



Şekil Ek 3. 9: Aşırı katkılı düz yüzeye sahip Se/Si(100) siyah silisyum örneklerin tepkisellikleri tamamı

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Ozan AYDIN

Doğum Yeri: ESKİŞEHİR

Medeni Hali: Bekâr

E-posta: ozan.aydin@yandex.com, ozanaydin@hacettepe.edu.tr, ozan.aydin@aalto.fi

Adresi: İşçi Blokları Mh., 1516. Cd., 11-B-3, 100. Yıl, 06530, Çankaya, ANKARA, TÜRKİYE

Avaruuskatu 3 H 143, 02210, ESPOO, FİNLANDIYA

Eğitim

Lisans: Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü (2007 – 2013)

Yabancı Dil ve Düzeyi: İngilizce (İleri)

İş Deneyimi

Nisan 2017 – Devam etmekte

Aalto Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Fakültesi, Elektronik ve Nanomühendislik Bölümü, Elektron Fiziği Grubu (EPG), Espoo, FİNLANDIYA

Tam zamanlı yüksek lisans stajyer

Eylül 2014 – Nisan 2017
Enstitüsü, Ankara, TÜRKİYE

Hacettepe Üniversitesi, Nükleer Bilimler

Tam zamanlı yüksek lisans öğrencisi araştırmacı

Deneyim Alanları

- Silisyum ve siyah silisyum fotodetektörlerin fabrikasyonu ve optoelektronik karakterizasyonu

- Silisyum ve siyah silisyum atomik katman biriktirme (ALD) pasivasyonu
- Pasivasyonlu silisyum yüzeylerde ışığa ve sıcaklığa bağlı bozunum (LID/LeTID) saptaması.

Tezden Üretilen Projeler ve Bütçesi

Hacettepe BAP Altyapı araştırma projesi: Silisyum Tabanlı Kızılötesi Fotodetektörlerin Geliştirilmesi (No: 013 A 605 001 – 392), 243.500 TL.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile katıldığı toplantılar

- Aydin, O., Utku, H., Tansel, T., Low Cost Infrared Photodiodes Based on Chalcogen Hyperdoped Black Silicon, Science and Applications of Thin Films Conference & Exhibition (SATF) 19 – 23 Eylül, Çeşme, İzmir, Türkiye, 2016



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 18.7.2017

Tez Başlığı / Konusu: AŞIRI SELENYUM KATKILI, SİYAH SİLİSYUM GÖRÜNÜR VE KIZILÖTESİ DEDEKTÖRLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam ...81... sayfalık kısmına ilişkin, 18.7.2017 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezin benzerlik oranı % 4 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Ozan AYDIN

Öğrenci No: N13221113

Anabilim Dalı: Nanoteknoloji ve Nanotıp

Programı:

Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

19.07.2017

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Yard. Doç. Dr., Tunay TANSEL,

(Unvan, Ad Soyad, İmza)



HACETTEPE UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING
THESIS/DISSERTATION ORIGINALITY REPORT

HACETTEPE UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING
TO THE DEPARTMENT OF

Date: 18/7/2017

Thesis Title / Topic: FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF SELENIUM HYPERDOPED, BLACK SILICON VISIBLE AND INFRARED DETECTORS

According to the originality report obtained by myself/my thesis advisor by using the *Turnitin* plagiarism detection software and by applying the filtering options stated below on 18/7/2017 for the total of81..... pages including the a) Title Page, b) Introduction, c) Main Chapters, d) Conclusion sections of my thesis entitled as above, the similarity index of my thesis is ...4.... %.

Filtering options applied:

1. Bibliography/Works Cited excluded
2. Quotes ~~excluded~~ / included
3. Match size up to 5 words excluded

I declare that I have carefully read Hacettepe University Graduate School of Science and Engineering Guidelines for Obtaining and Using Thesis Originality Reports; that according to the maximum similarity index values specified in the Guidelines, my thesis does not include any form of plagiarism; that in any future detection of possible infringement of the regulations I accept all legal responsibility; and that all the information I have provided is correct to the best of my knowledge.

I respectfully submit this for approval.

Date and Signature

Name Surname: Ozan AYDIN

Student No: N13221113

Department: Nanotechnology and Nanomedicine

Program:

Status: Masters Ph.D. Integrated Ph.D.

19.07.2017

ADVISOR APPROVAL

APPROVED.

Ass. Prof. Dr. , Tunay TANSEL ,

(Title, Name Surname, Signature)